



30 éves

A

MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA
MŰSZAKI FIZIKAI KUTATÓ INTÉZETE

BUDAPEST, 1987

***Jubileumi
évkönyv***



30 éves

a

**Magyar Tudományos Akadémia
Műszaki Fizikai Kutató Intézete**

BUDAPEST, 1987.

MTA KFKI Könyvtár



OLVASÓTERMI PÉLDÁNY

KIADJA:

Magyar Tudományos Akadémia
Műszaki Fizikai Kutató Intézete

FELELŐS KIADÓ:

Nagy Elemér igazgató

OLVASÓTERMI PÉLDÁNY

KÖZPONTI FIZIKAI KUTATÓ INTÉZETI KÖNYVTÁRA

leltárba véve 71.759. sz. alatt.

Budapest, 19.87. év VII. hó 6. n.

SZERKESZTŐ: 2015

Szép Iván

A SZERKESZTŐ MUNKATÁRSA:

Németh Györgyné

ISSN-0139-4363

Hozott anyagról sokszorosítva

8717221 MTA Sokszorosító, Budapest. F.v.: dr. Héczey Lászlóné



Budapest, 1967. március

MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA
Műszaki Fizikai Kutató Intézete
Budapest, IV. Fóti u. 56.

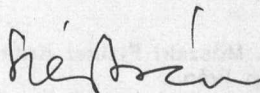
Tisztelt Olvasó!

A Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Fizikai Kutató Intézete ez év januárjában megalapításának harmincadik évfordulójáról tudományos ülés-szakon emlékezett meg. Ez a kiadvány az ülészakon elhangzott előadások alapján készült azzal a céllal, hogy a műszaki-tudományos fejlődés iránt érdeklődő ipari, gazdasági szakemberek, tudományos kutatók szélesebb körét megismertessük az Intézetben folyó munkával, annak főbb eredményeivel és vázoljuk a hazai műszaki fejlesztési célokhoz illeszkedő, a jövő-re vonatkozó elképzeléseinket.

Remélve, hogy ezzel is sikerült tevékenységünk iránt a figyelmet felkelteni, várjuk tisztelt olvasóink megkeresését, javaslatait.

Budapest, 1987. márciusa

Üdvözlettel,



Szép Iván
a műszaki tudomány
doktora

tudományos igazgatóhelyettes

Tartalom

MEGNYITÓ	1
Nagy Elemér az MTA lev.tagja, igazgató	

ÜDVÖZLÉSEK

TARJÁN Imre, az MTA r. tagja, osztályelnök	
Matematikai és Fizikai Tudományok Osztálya	7

PROHÁSZKA János, az MTA r.tagja, osztályelnök-helyettes	
Műszaki Tudományok Osztálya	10

VAJDA György, az MTA r. tagja, osztályelnök	
Műszaki Tudományok Osztálya	11

ELŐADÁSOK

Az MTA Műszaki Fizikai Kutató Intézetének harminc éve	15
Szép Iván	

Új félvezető vegyületek kutatása	27
Lendvay Ödön	

Anyagkutatás	43
Bartha László	

A látási érzetek objektív mérése	53
Schanda János	
A transzmissziós elektronmikroszkópia szerepe az anyagkutatásban és a technológia fejlesztésben	61
Zsoldos Lehel	
Új anyagok és struktúrák a mikrohullámu félvezető eszközökben	77
Mojzes Imre	
Vékonyrétegszerkezetek tervezhetősége elemi folyamatok ismerete alapján	93
Barna B. Péter	
Mély nivó spektroszkópia alkalmazása a félvezető anyagkutatásban	111
Ferenczi György	
A perkolációtól a kvantum transzportig - elméleti kutatások az MFKI-ban	121
Beleznay Ferenc	

M E G N Y I T Ó

A harminc éves MFKI jelenéről és jövőjéről beszélve, az első gondolatommal a tegnap délutánra kell utalnom, amikor is Szigeti György akadémikus domborművét az általa alapított intézetben lelepleztük. Ez az időbeni összeesés egyáltalában nem a véletlen műve, nagyon tudatosan választottuk ezt a lehetőséget, hogy Szigeti György elképzelésének ma is érvényes, alapvető helyességét nyilvánosan elismerjük.

Az elképzelés szószerint kiolvasható az alapító okiratból:

Ez így kezdődik:

- 1) Az anyagszerkezettel kapcsolatos műszaki-technológiai alapkutatások fejlesztése érdekében 1957.év január 1-től kezdődően Műszaki Fizikai Kutató Intézetet kell létesíteni.
- 2) Az Intézet feladata:
 - a) tudományos kutatás az anyagszerkezet, fémfizika és vákuumtechnika területén, valamint a műszaki-tudományos módszerek fejlesztése,
 - b) az alapvetően új gyártmányok előállításához szükséges alapkutatások elvégzése.

Erre a tevékenységre akkor is szükség volt, vitathatatlan, ma még nagyobb szükség van. Érdekes az alapítólevélben a műszaki-technológiai alapkutatás fogalma, valamint az alapkutatások céljellegének (új gyártmányok) hangsúlyozása.

Az, hogy mi a műszaki-technológiai alapkutatás, nagyon sokan próbálták már definiálni, de ezeknek a definícióknak hasznosságát és relevanciáját csak a valódi élettel való szembesítéssel lehet értékelni, szem előtt nem tévesztve, hogy a célkitűzés kétségen kívül innováció motivált.

Valószínűleg elfogadható az az értelmezés, amelyet az Intézet választott: a gyártmányorientált műszaki-technológiai alap kutatás egyaránt tartalmazza a fenti megkötések nélküli alap kutatást és alkalmazott kutatást egyaránt.

Póriasan kifejezve, ezt úgy értem, hogy nem szabad a világegyenletekre visszamenni, hanem alkalmazott kutatási stratégiával kell indulni, ugyanakkor azonban az eredményeket a legszigorubb, korszerű alapon kell értelmezni és mindenkor szem előtt tartani, hogy a legkisebb váratlan jelenség felléptekor a rendelkezésre álló természettudományos alapokat kritikusan át kell tekinteni, és ha azok hiányosnak bizonyulnak, a megfelelő alapismereteket saját kutatással megszerezni. Elválaszthatatlan igazság azonban az is, hogy az így megszerzett ismereteknek eljárásá vagy terméké fejlesztése olyan feladat, amely sem a kutató intézet, sem a termelő vállalat szűken értelmezett elsődleges feladatának nem felel meg.

Műszaki fejlődésünk nem kielégítő volta nem kis mértékben abban ke-
resendő, hogy ezen fejlesztési feladat mind a kutató intézetben, mind az
üzemben idegen (és ezért diszpreferált), ebből következően a kutató inté-
zeti eredmények az üzem termelésébe nem illeszkednek bele, amiért sokszor
az üzem eleve nem hiszi a kutatások számára releváns voltát és a kutatóin-
tézetet legfeljebb tűzoltó munkára akarná igénybe venni.

Nem szeretném azonban semmiképpen annak a látszatát kelteni, hogy
a kutatóintézeti pozíciót védve, a termelő üzemeket kívánnám elmarasztalni.
Két okból sem tehetem ezt: először is közismert, hogy az üzemek a nyere-
ségükből milyen keveset tudnak maguknak megtartani, de a második ok
számomra talán nyomósabb: ha kétfajta intézmény között szakadék van,
amellett mindkettő tevékenységére szükség van, akkor nem célszerű foko-
zatosan növekvő hangerővel a partnert elmarasztalni, hanem a saját oldal-
ról meg kell kezdeni valami hidat építeni. Elég jó tapasztalatom az, hogy
a hangerő csökkentés és a hidépítés megkezdése a másik oldalon is hasonló
tevékenységet indít meg. Így lehet csak - saját erőfeszítéssel - az innová-
ció fejlesztési láncszemét létrehozni.

A fejlesztő tevékenység helyének meg nem találása kritikusan veszé-
lyezteteti mind a saját innovációt, mind a licenconosítási tevékenységet. Na-
gyon sok licencvásárlás azért nem hozta a várt eredményeket, mert a vevő
nem rendelkezett megfelelő fejlesztési és kutatási háttérrel: kis zavar után
a vélt korrekciós intézkedések, a természettudományos ismeretek hiányában,

teljesen véletlenszerűek voltak. Ez nagy valószínűséggel egy még rosszabb helyzetre vezet általánosságban is, megkérdőjelezve az új technikák licencvétellel megszerzési lehetőségét.

Mint az sajnos ismeretes, az akadémiai kutató intézeteknek a fenntartásukhoz szükséges összegnek jó felét közvetlen pénzbevételekből, tehát vállalatok számára végzett kutatásból, licencadásból és termékelőállításból kell fedezniük. Ez az MFKI esetében körülbelül évi 50 millió Ft. Ez borzasztóan nehéz feladat, ha úgy kívánjuk megoldani, hogy a jövő fejlődési lehetőségeit se blokkoljuk le, emellett még tevékenységünkkel az intézetnek és egyben a magyar tudományos-műszaki kulturának nemzetközi elismerést is szerezzünk.

Világos, hogy ezt a szóban könnyen kimondható, de a valóságban rendkívül nehezen teljesíthető feltételt kielégítik az olyan műszerek, amelyek a tőkés piacon engedmény nélkül adhatók el, olyan eszközök rendszeres előállítása, amelyeknek importja embargo alá esik, célkutatás vállalása tőkés megbízásra, de nyugati árszinten (kb. 3000 Ft/kutató óra).

Részletekre bizonynyal ki fognak téri a kollégáim a következő előadásokban.

A nemzetközi kapcsolatainkhoz tartozik egy olyan vonás is, amire joggal büszkék vagyunk. A szocialista országok legmagasabb szinten nemrégiben elhatározták, hogy a gyorsabb fejlesztés érdekében az érintett intézmények, vállalatok egymással közvetlen kapcsolatba kell lépjenek. Az intézet tizedik éve végez megbízási kutatást a berlini Werk für Fernsehelektro-nik részére, részükről a szünet előtt dr. Heine, a kutatás vezetője fog felszólalni.

Egy intézet működésével kapcsolatban nagyon sokat lehet kérdezni, nagyon sok jogos elvárással lehet élni. De nem felejthető el az sem, hogy a jogos elvárások, az őket nem teljes mértékben támogató pénzügyi szabályozó és felügyeleti rendszer és a semmiképpen sem elhanyagolható társadalmi környezet határozott elképzelésen alapuló tudatos kompromisszumokat követel meg.

Ez a határozott elképzelés, mondhatjuk, töretlen az Intézet 30 éves életében: a nemzetközileg is annak értékelt innováció lehetőleg teljes folyamatának szemmel követése, természetesen különös tekintettel az alapozó és alkalmazott kutatási fázisokra.

Nagy Elemér
az MTA lev.tagja, igazgató

Üdvözlések

Uvönlésok

TARJÁN IMRE, az MTA r. tagja,
a Matematikai és Fizikai Tudományok Osztályának elnöke

A Magyar Tudományos Akadémia Matematikai és Fizikai Tudományok Osztálya nevében köszöntöm az MTA Műszaki Fizikai Kutató Intézet igazgatóját és valamennyi dolgozóját az Intézet fennállásának 30. évfordulója alkalmából.

Kevés olyan kutatóintézetünk van, amelyik létesítésével kapcsolatban annyi szempontot, gondolatot lehet elmondani, mint éppen a Műszaki Fizikai Kutató Intézet (MFKI) vonatkozásában.

Minden létesülő intézetnek vannak előzményei, van multja. A MFKI-t megelőzően életrehívott Központi Fizikai Kutató Intézet (KFKI) és a debreceni Atommagkutató Intézet (ATOMKI) alapjait egyetemi intézetek, tanszékek alkották, az MFKI mögött pedig multként elsősorban ipari kutatóintézet állt, az Egyesült Izzó Kutató Laboratóriuma.

A tudáspolitikai koncepció is más volt az egyik, mint a másik esetben. Az MFKI már létesítéskor olyan intézettípust képviselt, amelynek tevékenységében az alap- és alkalmazott kutatás kölcsönhatásának kellett érvényesülnie. Ez a körülmény különösen akkor érdekes, ha felidézzük az 50-es évek szemléletét. Az évtized elejét hazánkban a tudományos kutatás vonatkozásában is bizonyos fokú autarkia jellemezte, amely többek között szűk prakticista törekvésekben nyilvánult meg, és azt remélte, hogy a hazai tudományos kutatások önmagukban megoldják majd iparunk problémáit. Nem sokáig élt e felfogás és csakhamar egy másik, az akkori megfogalmazásban ugyancsak eltulzott nézet lépett helyébe. Ez utóbbi szerint az akadémiai intézeteknek alapkutatással kell foglalkozniuk. Mai szemmel nézve mindkét megfogalmazás szélsőséges, de mindkettő tartalmaz megfontolásra érdemes szempontokat. Az MFKI volt az elsők között, amelynek programjában a kutatás két alaptípusa egymás mellett, egymást kiegészítve és nem egymással szemben szerepelt.

Ha már a mult idézésénél tartunk, érdemes említeni egy másik felfogást is, amittől ugyancsak messzire kerültünk. A vállalatok munkájának megítélésében annak idején fontos szerepet játszott az egy főre jutó termelési

érték. Ilyen légkörben a vállalatok nem megtartani, hanem továbbadni akarták a kutató-fejlesztő részlegeiket. A napi problémák voltak érdekesekek, nem pedig a jövő. Az Egyesült Izzó vonatkozásában is nyilván motiválta ez a körülmény a tematikailag hozzá közelálló HIKI, majd annak egy laboratóriumából létesülő MFKI önállósulását. Ma már másképpen gondolkodunk: milyen jó lenne, ha minél több vállalatnál létezne a jövőt is szolgáló fejlesztő részleg.

Meggondolandó volt az MFKI létesítésekor a következő körülmény is. Kis ország vagyunk, nem foglalkozhatunk mindennel, nem fedhetjük le az egész fizikát. Az 50-es években az emberiség a magfizikától várta számos problémájának megoldását, de ugyanakkor volt kibontakozóban az ugyancsak ígéretes, de kevésbé látványos szilárdtestfizika is. Az előbbiért mi is illendően lelkesedtünk, ezt mutatja a KFKI és az ATOMKI akkori programja is, de az utóbbi művelése tűnt olcsóbbnak, és úgy látszott, hogy eredményei is gyorsabban alkalmazhatók a gyakorlatban. Az előzőekben az Egyesült Izzó Kutató Laboratóriumára utaltam, de másutt is voltak a szilárdtestfizikának hagyományai hazánkban. Így történt azután, hogy az 50-es években a magfizika mellett az érdeklődés itthon is főként a szilárdtestfizika felé fordult.

Az MFKI kezdeti céljai – miként az előzőkből is kitűnik –, a fémfizika, az anyagszerkezet és a vákuumtechnika területén új tudományos ismeretek és módszerek megszerzésére és kifejlesztésére irányultak, de csakhamar egyre nagyobb mértékben kiterjedtek a szilárdtestfizika más területére, különösen a rohamosan fejlődő félvezető fizika problémakörére is.

Ülésünk programja szerint az MFKI-nek a hazai szilárdtestfizikai kutatásokban betöltött szerepéről kell beszélnem. Minthogy a továbbiakban részletesen is szó esik az intézet 30 évéről, ezért a magam részéről – teljességre nem törekedvén – csupán utalni kívánnék néhány területre illetve eredményre.

a) Nagyra értékeli a tudományos közvélemény itthon és külföldön egyaránt az Intézetnek a poralaku rendszerek magashőmérsékleten végmenő szinterelésével kapcsolatos fizikai és fizikai-kémiai kutatásait. Értehetően különös hangsúlyt kapott az adalékok szerepe wolfram-fém por esetében. 30 éves sikeres kutatómunkáról van szó, amelyben elméleti és kísérleti tevékenység szorosan összefonódva segítette gyakorlati célok, jobb termékek előállítását.

b) Jó időben ismerte fel az intézet a galliumarzenid típusu vegyület-félvezetők és az ezekből készíthető un. heteroátmenetek fontosságát, amely anyagféleségek elektroluminescens tulajdonságai képezik alapját a mai félvezető világító- és lézer-diódáknak.

c) Ugyancsak komoly, két évtizedes multra tekint vissza az Intézet vékonyréteggutatása. Az első eredmények egyikét említem: In situ módszerrel dolgoztak ki vékony fém- és félvezetőrétegek elektronmikroszkópban ultranagyvákuum körülmények között történő előállítására. Így közvetlenül meg tudták figyelni a nukleációt és a réteggépződést befolyásoló folyamatokat. Meghatározták a rétegek tulajdonságait is.

Gratulálok az eredményekhez és sikeres folytatást kívánok.

PROHÁSZKA JÁNOS, az MTA r. tagja

a Műszaki Tudományok Osztályának elnökhelyettese

Meglehetősen elfogódottsággal teszek eleget annak a kedves kötelességemnek, hogy a Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Tudományok Osztálya nevében üdvözljem ennek az ünnepi ülésnek minden résztvevőjét, elsősorban a Műszaki Fizikai Kutató Intézet munkatársait és meghívott vendégeit, ugyanakkor kifejezzem az Osztály nagyrabecsülését eddigi sikeres munkájukért, amivel mind a hazai, mind a nemzetközi szakkörök nagyrabecsülését kiérdemelték és egyuttal sikereket kívánjak a soronkövetkező feladataikhoz is.

Elfogódottságom és kissé bizalmas megszólításom onnan ered, hogy a ma ünnepelt akkori eseménynek, az Intézet alapításának magam is, mint annak egyik munkatársa részese lehettem. Jól emlékszem azokra a várakozásokkal és reményekkel teljes időkre, amikor annak a három - nyugodtan mondhatom - világhírű akadémikusnak, Millner Tivadarnak, Szigeti Györgynek és Winter Ernőnek a vezetésével, akiket az Akadémia az Intézet élére állított, egy maroknyi kutató nekivágott annak a feladatnak, hogy az anyagtudomány néhány területén mind az alapkutatásokat, mind azoknak a műszaki területre való hasznosítását elősorban a hazai híradástechnikai ipar számára elvégezze.

Akkor, amikor örömmel üdvözlöm körünkben Millner akadémikust, aki a hazai volfrámgyártásnak az egész világon elismerést szerzett és aki mellett évekig dolgozhattam, fejet hajtok Szigeti és Winter akadémikusok emléke előtt. Az a véleményem, hogy e három kimagasló szakember együttes tevékenysége volt az a biztos alap, amire a Műszaki Fizikai Kutató Intézet épült. És ez tette lehetővé, hogy az intézet annak a gyors fejlődésnek az útjára léphetett, amin azóta is sikerrel jár.

Meggyőződésünk, hogy annak a néhány tudomány-területnek a jövője, amit az intézet művel, ma is jó kezekben van és az elkövetkező időkben is sikerekkel és a népgazdaság számára is hasznos eredményekkel fogják gazdagítani mind az alap, mind az alkalmazott kutatásokat, ha ezeket a területeket szabad egyáltalán külön említeni.

Végül felolvasom a MTA Műszaki Tudományok Osztálya Elnökének, Vajda György akadémikusnak az ünnepi ülés résztvevőihez írt levelét.

VAJDA GYÖRGY, az MTA r. tagja
a Műszaki Tudományok Osztályának elnöke

A Magyar Tudományos Akadémia Elnökségének harminc év előtti döntése, mellyel műszaki alapkutatások folytatására létesített kutatóintézetet, tükrözte azt a felismerést, hogy korunkban a tudományos kutatási eredmények egyre nagyobb hányada a technika és a technológia szférájában valósul meg és ehhez viszont megfelelő felkészítésű közvetítő kutató-fejlesztő szervezetekre van szükség.

Az eredeti alapító levél az anyagszerkezet, a fémfizika és a vákuum-technika területeit jelölte ki kutatásra. Ezek a területek elsősorban az Egyesült Izzó, mint ipari partner akkori alapkutatási igényeit vették figyelembe, pl. a porkohászati uton előállított volfrám technológiájának, az izzólámpák tartósságának, a szilárdtestek elektronemissziójának és a vékony fémrétegek kialakulásának kutatási témáiban. Hamarosan kibővült a témakör a félvezető anyagok és eszközök kutatásával. Az anyagtechnológiai kutatások mellett, új feladatként szerepeltek mérés technikai kutatások pl. a fényforrások fotometriájának területén.

E kutatásokra mindvégig jellemző az adott probléma tudományos megközelítése, és ezzel együtt az eredményeknek a gyakorlatba való átültetése. Az évek folyamán a Műszaki Tudományok Osztályának különböző szakbizottságai elismeréssel értékelték az Intézetnek ilyen jellegű tevékenységét. Az Intézet maradandó eredményeket ért el a porkohászati volfrámtechnológia, a félvezető rétegszerkezetek és az $A^{III}B^V$ típusu félvezető anyagok és eszközök technológiájának területén. Úttörő jellegűek a felületi akusztikus hullámok alkalmazásával kapcsolatos kutatások, a galliumarzenid alapú mikrohullámu és optoelektronikai eszközök konstrukciójával és technológiájával kapcsolatos kutatások, amelyek sorban egy-egy korszerű mikroelektronikai eszköz prototípusának megalkotásához vezettek. Az Intézet a kidolgozott eszközökből mintasorozatokat állított elő és azt a felhasználók rendelkezésére bocsátotta.

A közismerten hézagos innovációs lánc működtetése érdekében az Intézet az alkalmazási területekre is kiterjesztette tevékenységét. Jellemző példája ennek a mikrohullámu távmérő konstrukciójának a Magyar Optikai Művekkel közösen megvalósított kifejlesztése. Hasonló kezdeményezés az optikai hírközlés adó- és vevő moduljainak fejlesztési programja, amely a VII. ötéves terv G-1 jelű programjának részét képezi.

Az új technológiák iránti érdeklődést tanúsítja az Intézetnek a G-2 és G-5 jelű K+F programokhoz való csatlakozása, amelyekben új típusú fémfeldolgozási technológia, ill. mikroelektronikai alkatrészek kidolgozása az Intézet vállalt feladat.

E néhány kiragadott téma is bizonyítja, hogy a MFKI nemcsak betartotta vállalt kötelezettségeit, hanem a nemzetközi haladást követve korszerűsítette kutatási területeit és az igényeknek megfelelően bővítette tevékenységének skáláját.

A Műszaki Tudományok Osztályának Elnöksége nevében az Intézet 30 éves fennállása alkalmából elismerésemet fejezem ki az alkotó kollektívának a végzett munkáért, az elért eredményekért és további sikereket kívánok az elkövetkezendő években.

Előadások

Az MTA Műszaki Fizikai Kutató Intézetének

harminc éve

Szép Iván
a műszaki tudomány doktora

1956. október 3-án hozta a Minisztertanács azt a határozatot, mely 1957. január 1-vel Műszaki Fizikai Kutató Intézet létesítését rendeli el. Mi tette szükségessé a Magyar Tudományos Akadémia keretei között egy, műszaki témákkal foglalkozó kutató intézet létrehozását? Ismeretes, hogy 1948-49-től kezdődően országunkban számos kutató intézetet alapítottak. Ezek közül az MTA intézetei a tudományos alapkutatás, az ipari kutató intézetek az ipari fejlesztés területén alakították ki tevékenységüket. Hamarosan kiderült, hogy ebből a felosztásból kimaradt egy igen lényeges feladat, az új tudományos eredmények ipari adaptációjának köre. Az alaptudományok művelői a gyakran hangoztatott jelmondat ellenére, amely szerint "a ma tudománya a holnap technikája", nem mutattak különösebb érdeklődést, az ipari kutatóhelyek pedig egyre inkább a gyártás napi problémáinak megoldásával voltak elfoglalva. Az új termékek, új technológiák tudományosan megalapozott fejlesztésével foglalkozó intézmények hiánya különösen azoknál a vállalatoknál volt érezhető, amelyek korábban önálló kutató szervezettel rendelkeztek. Egyes iparágakban, mint pl. az elektrotechnikai ipartól különvált és rohamosan fejlődő elektronikai iparban új ipari korszak kezdődött, egy új típusú kutató-fejlesztő-adaptáló intézetre tehát mindenképpen szükség volt.

Mindamellet az MFKI létrehozása nem volt előzmény nélküli. Tradíciói az Egyesült Izzó háboru előtti kutatólaboratóriumában gyökereztek és a Szigeti Györgyből, Winter Ernőből és Millner Tivadarból álló vezető triász tudományos életpályája meghatározó tényező volt az új intézet első feladattervének kialakításában. A magasolvadáspontú fémek, a szilárd testek szerkezete és a vákuumtechnika kijelölt területein végzendő kutatások egyrészt a fényforrás és elektroncső gyártás, másrészt az ujonnan jelentkező félvezető-technika új termékeinek és technológiai eljárásainak tudományos megalapozá-

sát voltak hivatva elősegíteni. Az alapítási dátumból látható, hogy az intézet megszületésének körülményei nem voltak éppen ideálisak. A tényleges megalakulásra nem is akkor, hanem csak 1958. folyamán került sor. Ekkor kezdődött a kutatógárda toborzása az egyetemek végzett hallgatói közül, körvonalazódott a székházra vonatkozó terv. A székház 1965-ben történő átadásáig a tudományos vezetők irányításával folyt az Intézet kutató gárdájának megszervezése, a fiatal kutatók képzése az Egyesült Izzóban, a Híradástechnikai Ipari Kutató Intézetben, ill. a Központi Kémiai Kutató Intézet épületében.

Mindeme hányattatások ellenére az 1968-ban tartott tizéves évfordulón az Intézet kutatói már számottevő új eredményekről tudtak beszámolni.

Az alapító levélben meghatározott, a mai megnyitóban említett feladatok közül átfogó vizsgálatok folytak a jóminőségű izzólámpagyártáshoz nélkülözhetetlen nagykristályos, alaktartó volframhuzal kialakulási mechanizmusának feltárására, a domináns adalékok hatás módjának kiderítésére, a rekrisztalizáció során lejátszódó folyamatoknak fizikai paraméterek (elektromos ellenállás, termofeszültség, tartós folyás, elektronemisszió) mérésével történő követésére, adalékok diffúziójának autoradiográfiás modellezésére. A kritikus atomfajták (K, Al, Si) más atomokkal történő helyettesíthetősége ráirányította a figyelmet a rácsszerkezet idegen atomok által történő módosulására mint a kristálynövekedés preferált irányát feltehetően befolyásoló tényezőre.

Új felismerésekhez vezetett az izzólámpákban ivleégés néven ismert tönkremenetel okainak vizsgálata, ahol is az izzószálból magas hőmérsékleten kipárolgó alkáliion felhőben végbemenő kisülés döntő szerepét sikerült bizonyítani.

Az alapító levélben módszerfejlesztésként megjelölt feladatok közül a vékony fémrétegek képződésének elektronmikroszkópos vizsgálata vezetett új eredményekre a nukleáció és a kondenzáció lépéseinek követésével, a kritikus méretű magok folyadékszerű viselkedésének megfigyelésével, az aktív maradékgázok szerepének bizonyításával.

A félvezető kutatások jelentősége az ötvenes évek végére világszerte megnőtt. Szigeti György érdeme, hogy az MFKI-ben is jelentős számú kutatót irányított erre a területre. E kutatók először a germánium és a

germániumeszközök technológiájában a HIKI-ben és az Egyesült Izzóban szerezték jártasságot, majd a MFKI-ben önálló kutatások kezdődtek az egykristályos germániumban tapasztalt inhomogén, de periodusos adalékeloszlás okainak felderítésére, a plasztikus deformációval bevitt diszlokációk elektromos viselkedésének leírására. Modellkísérletek indultak epitaxiás germániumrétegek növekedési feltételeinek tisztázására mind ultravákuumban, mind kloridvegyület redukciójával. Mai fogalmak szerint a molekulásugaras epitaxia és a CVD-technika kezdeteivel találkoztak az MFKI kutatói - több mint husz évvel ezelőtt.

A korábban említett tradicionális "Tungsrám" témakon kívül a MFKI-ben folytatódtak a lumineszkáló anyagokra vonatkozó kutatások, különös tekintettel a cinkszulfid különböző módosulataira és az elektrolumineszcencia jelenségére. Tömbös cinkszulfid és kadmiumszulfid egykristályok növesztésére irányuló sikeres kísérletek alapján a rácshibák szerepére és a gőzfázisból történő kristálynövekedési mechanizmusra vonatkozó értékálló megállapítások születtek. Az $A^{III}B^V$ típusú félvezetők közül eredményes kutatómunka folyt galliumarzenid és a galliumfoszfid kristályok galliumoldatból történő előállítására.

Üttörő munkát végeztek az Intézet kutatói a félvezető heteroátmenetek előállítása és vizsgálata területén. Az itt készített unikális ZnS-GaP heteropár mindmáig a lehetőségek példája az heteroátmenet kutatás számára.

A gazdaságirányítás reformja új követelményeket támasztott a hazai kutatással szemben, fokozottabb közreműködést a termelési módszerek és termékek korszerűsítésében. Ez hosszabb távra előretekintő kutatási tervek készítését tette szükségessé. Az MFKI az 1969-1971 évekre szóló kutatási tervében ennek érdekében egyrészt kibővítette alapkutatásainak körét, másrészt szorosabb együttműködésre lépett a vákuumtechnikai és a félvezetőgyártó ipar kutató-fejlesztő szakembereivel a már fejlesztésben levő új termékek anyagtudományi problémáinak megismerése céljából.

Az új tématervben változatlan hangsúllyal szerepeltek a volframtechnológiai kutatások, olyan célkitűzésekkel, mint pl. a volfram oxid redukációs fázisainak elkülönítése, a volframhuzal magas hőmérsékletű rekrisztallizációjának és tartós folyásának vizsgálata saját-elektron emissziós leképezés segítségével. A szinterelt volfrám rudak törésfelületeinek vizsgálata egyre



több információval szolgált a szemcsehatárokon felhalmozódott idegen fázis részecskék mibenlétéről. A volfrámspirálok szakadási helyeinek elektron-mikroszkópos vizsgálata támpontokat adott e helyek képződésének okairól.

A félvezető kutatásokban a figyelem a felületek és határfelületek tulajdonságainak tanulmányozására irányult. Atomosan tiszta germánium felületek, oxidréteggel fedett felületek, szilícium-kvarc, szilícium-zafir réteg-kombinációk képezték a vizsgálatok tárgyát. Az $A^{III}B^V$ típusu félvezető rendszerekben létrehozható elektrolumineszcencia kutatása tovább folyt, tervszerű fejlesztés történt egy sor új kísérleti-vizsgálati módszer meghonosítására, mint a lassu elektronok diffrakciója, vákuum UV-reflexiós spektroszkópia, téremissziós mikroszkópia és nem utolsósorban a kristályhibaszerkezet felderítésére szolgáló röntgen topográfia. Néhány kiválasztott témában, mint a rekombináció törvényszerűségei, plazma- és instabilitási jelenségek, színvonalas elméleti vizsgálatok kezdődtek. Az ipar új fejlesztési problémáinak megismerését célozták a fém-szilíciumoxid-szilícium (MOS) rendszer oxid-rétegének előállítására és ettől függő fizikai tulajdonságainak meghatározására irányuló kutatások.

Visszatekintve erre az időszakra el kell ismerni, hogy a témák legnagyobb része aktuális és fontos irányzatokhoz kapcsolódott ugyan, de hamarosan kiderült, hogy az Intézet kutatói létszáma és technikai adottságai nem elégségesek a szükséges hatékonyság eléréséhez. Különösen sok gondot okozott a korszerű technológiai és szerkezetvizsgálati berendezések, műszerek hiánya, így az előrehaladás a kelleténél lassabb volt és a tervezettnél kevesebb témában volt elérhető. Ennek ellenére az Intézet ebben az időszakban is egy sor nemzetközileg jegyzett eredményt mondhat magáénak. Az 1970-ben Budapesten megrendezett Nemzetközi Heteroátmenet Konferencia először készített világmérleget az e területen folyó kutatások eredményeiből és ezek igen tekintélyes hányadát az MFKI kutatói szolgáltatták.

Ez volt az az időpont, amikor a félvezető kutatásokban átmenetileg lezárult az új utak keresésének korszaka és a vezető ipari államok kutatói is az addig felismert lényeges kérdésekre koncentrálták erőfeszítéseiket.

Az 1971-ben induló Országos Távlati Tudományos Kutatási Terv "Szárdtestek kutatása" főiránya a tudománypolitikai célkitűzéseknek megfelelően már hangsúlyozottan új anyagok és termékek kidolgozását tűzte ki

célul, így Intézetünk a korábbi jelenségcentrikus témákat redukálva a hazai műszaki fejlődést szolgáló, új termékek létrehozását elősegítő kutatásokat vett tervbe, több esetben konkrét termékek kidolgozását is célul tűzte ki. Ebben az időszakban a félvezető kutatások a GaAs és GaP alapú rétegstruktúrákra, az ezekben létrehozható elektrolumineszcencia jelenségek, domén folyamatok tanulmányozására koncentráltak, melynek eredményeként GaAs és GaP alapú "világító diódák" előállítási módszerei is kidolgozásra kerültek, kereskedelmi termék színvonalát megközelítő paraméterekkel.

A galliumarzenidben létrehozható domén vándorlás alapján a 10 GHz-es tartományban oszcilláló diódák technológiáját már konkrét ipari termék céljából dolgozták ki az Intézet kutatói, amellet, hogy számos új felismerés történt a fém-GaAs kontaktus rendszer képződéséről és fizikai tulajdonságairól.

A fém-szigetelő-félvezető rendszerek témakörében vizsgálatok kezdődtek memória célokat szolgáló szilícium alapú töltéstároló struktúrák technológiájának és tulajdonságainak kidolgozására. A tervidőszak végén ezek a munkák működő integrált modell-áramkörök elkészítésével zárultak.

A volfrámtechnológiai kutatások ebben az időszakban az alakítási körülmények szerepének vizsgálatára terjedtek ki, a kimutatható idegen zárványok (oxid, karbid) hatásának vizsgálatára. Egyre több érv szólt amellet, hogy a nagykristályos volframhuzal rosthatárain nagy nagyításban észlelhető pórusfüzéreknél meghatározó szerepük van a rostos szerkezet kialakulásában. A szakirodalomnak azt a megállapítását, hogy a pórusok fém-káliumot tartalmaznak, $0,1 \mu\text{m}$ keresztmetszetű elektronsugár segítségével röntgenspektroszkópiai úton 10^{-17} g pontossággal sikerült kimutatni.

A gáztöltésű volframlámpákban jelenlevő gázalaku adalékok (halogének, szén, oxigén) és az izzó volframszál között lejátszódó kémiai reakciók termodinamikai számításaival sikerült a lámpák működésében meghatározó anyagtranszport törvényszerűségeit levezetni és ezek alapján kedvezőbb tulajdonságú halogéntöltésű fényforrásokat kidolgozni.

A szilíciumkristályok hibaszerkezetének vizsgálatában kulcsszerepet játszó röntgentopográfiás módszerek teljesítőképességét korszerű röntgenkamra konstrukció kidolgozásával sikerült jelentősen megjavítani.

A hetvenes évek közepén egyre sürgetőbbé vált a hazai vaskohászat és acélipar technológiai korszerűsítése. A MFKI bekapcsolódott ebbe a tevékenységbe, így pl. közreműködött az acéolvadék oxigén tartalmának meghatározására szolgáló szilárd elektrolitcellás módszer bevezetésében, a hengerelt acéllemezek deformációjának kiküszöbölésére a sikkifekvést biztosító, hengersizabályozó automatikát fejlesztett ki és telepített a Dunai Vasmű hengersorára.

A gyakorlati célokat követő kutatások mellett nem szorultak vissza az új fizikai jelenségek felderítésére és alkalmazására irányuló kutatások sem. A piezo-elektromos anyagokon elektromos térrel létrehozható ún. akusztikus felületi hullámokkal végzett vizsgálatok alapján a MFKI kutatói megfelelően méretezett fésűs elektródarendszerek segítségével az MTA Kristályfizikai Kutatólaboratóriumában előállított litiumniobát kristályokból nagyfrekvenciás szűrőket dolgoztak ki, amelyeket eredményesen alkalmaztak hazai TV-készülékekben és gyártásra átvett a Híradástechnikai Ipari Kutató Intézet.

Az új méréstechnikák közül az Intézet kutatói továbbfejlesztették az Auger-elektronspektroszkópiai módszert, amelyet eredményesen alkalmaztak volfrám, molibdén és acél töretfelületek vizsgálatára.

Lényegesen kibővült a fényforrás-fotometria köre azáltal, hogy megrendelői igényre egy sor műszert fejlesztettek ki az intézet kutatói, pl. fényintenzitás eloszlás mérésére, színvizsgálat és színmérés céljaira. Önálló értékesíthető konstrukciónak bizonyult a mikroprocesszor vezérlésű lámpavizsgáló fotométer ill. a goniofotométer, amelyből külföldi vevők is rendeltek.

Az anyagtechnológia fejlődése új, korábban nem vizsgált paraméterek mérését tette szükségessé, amihez kereskedelmi forgalomban nem voltak kaphatók megfelelő műszerek. Ebben a helyzetben jó elképzelésnek bizonyult ilyen célú műszerek, mérőberendezések késztermék formában történő kifejlesztése. Kiemelendő ezek közül a nemzetközi piacon is sikert aratott mély-nívó-spektrométer, amellyel félvezető anyagokban az elektromos töltésáramlást károsan befolyásoló szennyező atomok, rácshibák jellemző energiaértéke, koncentrációja, térbeli eloszlása meghatározható. A műszert az Intézet kutatói a Központi Fizikai Kutató Intézet munkatársaival közösen fejlesztették ki és gyártását a RADELKIS szövetkezet végzi.

A hetvenes évek közepén a műszaki fejlődésben elmaradt ipari területek közül egyre kirívóbbá vált a hazai mikroelektronikai alkatrészipar helyzete. Ezért négy kutatóintézet összefogásával LSI-kutató-fejlesztő társulás alakult, amely célul tűzte ki az elsődleges fejlesztési feladatát, a nagyintegráltságu áramkörök korszerű technológiájának gyorsított kifejlesztését, valamint felderítő kutatások végzését néhány specifikus mikroelektronikai termék (memóriák, mikrohullámu és optoelektronikai elemek) megvalósítására. E szövetségben az MFKI kutatói is számottevő feladatokat láttak el, pl. információ megtartó félvezető memóriák (FAMOS, MNOS) technológiájának kifejlesztésében, galliumarzenid bázisu mikrohullámu keverő diódák kidolgozásával, az integrált szilícium áramkörök hibadiagnosztikai vizsgálati rendszerének megvalósításában.

Hazai iparvállalatokkal fennálló kapcsolataink mellett ezekben az években kezdődött a rendkívül gyümölcsöző műszaki-tudományos együttműködés a berlini Werk für Fernsehelektronik vállalattal, amely lehetőséget adott az optoelektronikai kutatásokban szerzett tapasztalatok közvetlen hasznosítására. Világító diódák hatásfokát, degradációját vizsgálva a MFKI jelentősen hozzájárult a gyártástechnológia továbbfejlesztéséhez. Az intézet több speciális műszert fejlesztett ki ezekhez a vizsgálatokhoz, valamint a késztermékek fotometriai adatainak meghatározására.

A VI. ötéves tervben induló Országos Középtávu Kutatási-Fejlesztési Terv új feladatokat és új lehetőségeket állított az intézet elé. Három programban vállaltunk közreműködést: az anyag- és energiatakarékos technológiák, a mikroelektronikai alkatrészek technológiájának és az anyagtudomány és anyagtechnológiai kutatási-fejlesztési programjában. Mint ismeretes, ezekbe a programokba az érdekelt iparvállalatok is bekapcsolódtak, ami elvileg az új fejlesztési eredmények gyorsabb hasznosítását volt hivatva elősegíteni. Ez a feltevés, sajnos nem bizonyult valósnak.

Az 1980-81. évek restriktív pénzpolitikája a beruházásokat drasztikusan visszafogta, a tőkés piacról műszerek, berendezések beszerzését szinte lehetetlenné tette. Az akadémiai kutatóintézetekre kényszerített létszámleépítés gyakorlatilag a tervszerű kutatóképzést, a feladatokkal arányos létszámfejlesztését akadályozta meg. Mindez az intézet tevékenységében átmeneti fennakadásokat, kényszerű pályamódosításokat okozott. Jellemző az anyagtudományi programban tervezett galliumarzenid kristálynövesztő laboratórium

sorsa, ahol már minden nehézséget sikerült elhárítani a kristályhuzó berendezés beszerzése előtt, az importengedély megtagadása azonban az egész ügyletet és ezzel az egész programot meghiusította. A zsugorodó értékű kutatási támogatás kiegészítésére egyre nagyobb arányban vált szükségesé értékesíthető termékek előállítása intézeti keretek között, azonnal alkalmazható ipari technológiák fejlesztése. Mindamellett ebben az időszakban is létrejöttek új gondolatokon alapuló kutatási eredmények, mint pl. redox-katalitikus eljárás kidolgozása molibdén magnak volfrámspirálisból történő kioldására, az anyag- és energia takarékos technológiák fejlesztési programjának keretében, a keményfém-hulladékból az értékes kobalt, volfram, tantál kinyerése elektrokémiai módszerrel. Egy egészen új elveken alapuló környezetkímélő technológia fejlesztése indult meg elektrodialízis és oldószeres extrakció alkalmazásával, amelyről az ülésszak további részében részletesebben lesz szó.

A galliumarzenid bázisú mikrohullámu alkatrészek előállításán túl az Intézet alkalmazástechnikai feladatokba is bekapcsolódott, Doppler-modul, oszcillátor szerelvény kidolgozásával lényeges ipari és biztonságtechnikai célok megvalósítását segítette elő.

Résztvett az Intézet az "Interkozmosz" tanács által szervezett úrkutatói "Eötvös-programban": galliumarzenid és galliumantimonid egykristályok mikrogravitációs körülmények között történő előállításához anyagmintákat és szerelvényeket készített elő és kiértékelte az eredményeket.

Az egykristálylaboratórium kiesése ellenére kerestünk és találtunk lehetőséget a tervezett kísérletek elvégzésére a párizsi MASPEC kutatólaboratóriummal kooperálva, ahol sikerült Czochralski-eljárással jó minőségű galliumarzenid egykristályokat előállítani. Idehaza a Bridgman-módszer korszerű változatának megvalósítására indultak kísérletek. Az $A^{III}B^V$ típusú vegyületek elegyfázisainak növekvő fontosságát felismerve ternér, kvaternér és pszeudo-kvaterner elegyek előállítására folytak kísérletek.

A fényvezetős távközlési rendszerek világszerte tapasztalható terjedése ezek komponenseinek kutatását is napirendre tűzte. A mikroelektronikai alkatrészprogram keretében megkezdődött a galliumarzenid alapú lézerdiódák előállítási módszereinek kidolgozása: a fényvezető szálak fizikai paramétereinek meghatározására vizsgálati módszereket és eszközöket dolgoztak

ki az intézet kutatói. Lényeges előrehaladás történt az $A^{III}B^V$ vegyületek epitaxiás rétegnövesztésére alkalmas technológiai berendezések beszerzésében. Szovjet licenc megvásárlásával galliumarzenid gőzfázisú epitaxiás növesztésére alkalmas üzemi berendezés és ismeretek birtokába jutottunk, egy hazai fejlesztésű és egy svéd importból származó berendezéssel a folyadékfázisú epitaxiás növesztés kísérleti feltételeit javítottuk.

Sajnos, a technológiai felszereltség javítása csak kevés helyen sikerült. Ha figyelembe vesszük, hogy az OKKFT programok második fordulója rövid távon egy sor iparág modernizálását, új iparágak megteremtését tűzi ki célul, adottságainkat nem tekinthetjük kielégítőnek. Gép-, műszer-állományunk műszaki értéke 50%-os: néhány 75%-os nagyértékű műszer és sok 25%-os kisértékű műszer átlaga. Ilyen feltételek mellett hozzájárulásunk a nemzeti elektronizálás programjához, vagy a környezetkimélő új technológiákhoz csak állóeszköz parkunk számottevő hányadának felújításával lehet hatásos. Az olyan nemzetközi együttműködéshez, mint a KGST 2000-ig tervezett komplex fejlesztési programja, csak nagyon gondos mérlegelés után csatlakozhatunk.

Ez a helyzet tehát látszólag nem nevezhető biztatónak. A MFKI harminc éves tevékenységére visszapillantva azonban talán sikerült érzékeltetnem, hogy Intézetünk eddig sem volt tulzottan a sors kegyeltje. Mégis elfogultság nélkül állithatom, hogy nehéz helyzetekben az intézet vezetése és dolgozó kollektívája mindig talált megoldást a kutatómunka folytatásának biztosítására, kezdve a témák korszerűsítésétől, új, aktuális és az adott helyzetben nagy valószínűséggel elvégezhető feladatok kitűzésétől, a működéshez szükséges pénzforrások biztosításáig. Az alapítólevélben megfogalmazott feladatok annak idején a vákuumtechnikai ipar termékeivel kapcsolatos alapkutatásokat irányozták elő. Egy idő múlva ez túl szűkreszabott mozgástérnek bizonyult: az Intézet nem habozott új tématerületeket kialakítani a szilárdtestek és félvezetők fizikája és technológiája területén. A műszaki fejlesztés országos céljainak megfogalmazását követően továbblépett új ipari termékek és technológiák kidolgozásának irányában, majd érzékelve az ipari fogadókészség gyakori hiányát termelési és applikációs feladatokat is vállalt, sőt termelési kooperációkba is bekapcsolódott.

Mindez elősegítette a kutatási eredmények közvetlen hasznosítását, de azért észre kell venni, hogy az új kutatási feladatok bizonyos fokig háttérbe

szorultak. Ez azzal a veszéllyel jár, hogy új műszaki megoldások, műszaki-tudományos felismerések létrehozására nem marad elegendő kapacitás, sem idő. Az elmúlt harminc év alatt az intézet kutatói létszáma a kezdeti 35-ről alig százra növekedett, a székház méretei további bővülést nem tesznek lehetővé. Így célszerűnek látszik a jövőben a nem-kutatási jellegű tevékenységet különböző társulásokra bízni, és a jelenleginél nagyobb erőket koncentrálni a közvetlen kutatási feladatok megoldására. A műszaki kutatás iparunk szerkezeti megújulásának kulcskérdése, ebben intézetünk multjához méltó feladatok megoldásával kíván részesedni.

Az alapító levélben kitűzött feladatok közül végezetül csak röviden utalok nemzetközi kapcsolatainkra, amelyek a már említetteken kívül 12 ország rokon profilu intézetével állnak fenn és jellegük szerint az időközönkénti információ cserétől a többhónapos közös kutatásig terjednek. Kutatóink publikációs szorgalma is elismerésre méltó: az eltelt harminc év alatt közel háromezerre tehető azoknak a közleményeknek a száma, amelyek mértékadó nemzetközi szaklapokban vagy szabadalmi leírás formájában láttak napvilágot. A munkák összefoglalói intézeti kiadású monográfiákban, 1977-től kezdve magyar és angol nyelvű évkönyvekben hozzáférhetők. Az intézet 100 kutatója közül 3 rendelkezik a tudomány doktora, 25 a tudomány kandidátusa és 20 egyetemi doktori fokozattal. Résztvesz az Intézet az aspiránsképzésben és mint kijelölt kutatóhely, a fiatal tudósok képzésében. De ennyi statisztika talán elég!

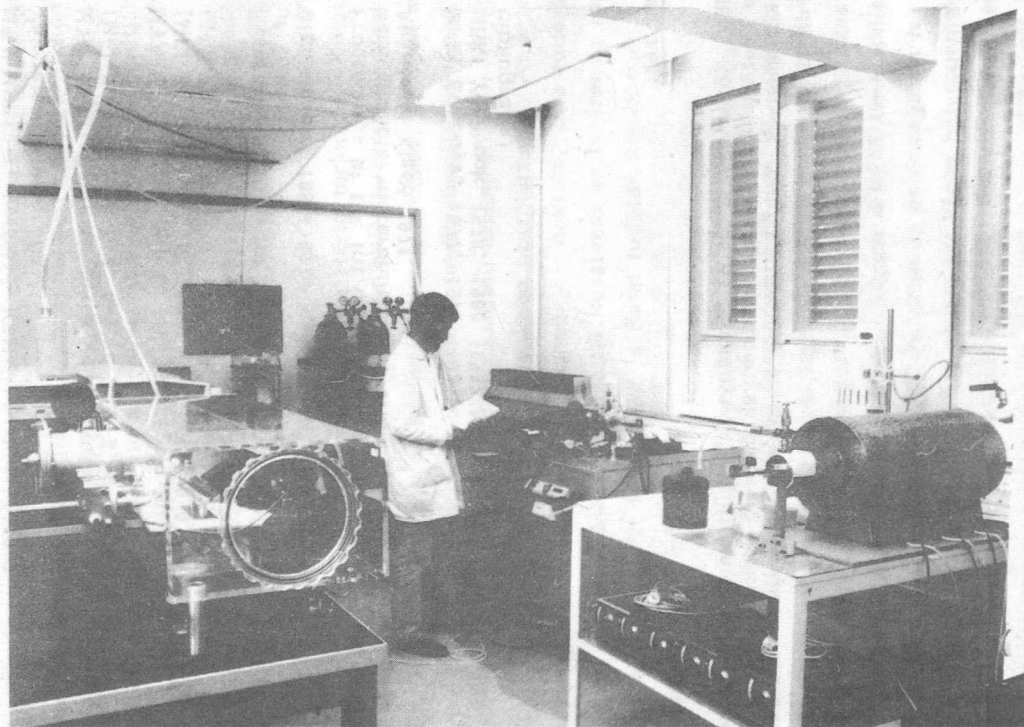
Harminc évvel ezelőtt magam is ott bábáskodtam a MFKI születésénél, irányítottam szakterületemen a fiatal kutatójelöltek első lépéseit. Azóta az intézet a hazai műszaki kutatás egyik legjelentősebb, külföldön is hírnévnek örvendő bázisintézményévé fejlődött. A szokásosan egy-egy szakterületre összepontosító kutatási intézményekhez képest a MFKI tematikailag rendkívül heterogén szervezetnek látszik. De talán ez az önmagában is változó, a külső feltételekhez állandóan alkalmazkodni képes heterogenitás az, ami fenntartja az intézeten belüli interdiszciplináris ráhatásokat és segít gyorsan határozni egy-egy érdektelenné vált téma megszüntetéséről, vagy egy új téma beindításáról. Ugy gondolom, hogy ez olyan tulajdonság, amely nélkülözhetetlen egy újabb harminc év sikeres tevékenységéhez!

Irodalom

1. MTA Műszaki Fizikai Kutató Intézete: Jubileumi Tudományos Ülésszak 1958-1968 (Előadások kivonatai)
2. MTA MFKI: Tudományos Közlemények 1958-1967
Válogatott bibliográfia
3. MTA MFKI: Tanulmányok a volframkutatás új eredményeiről
(MFI Közlemények 0-2, 0-4, 0-7, 0-8, 0-11, 0-15, 0-17 sz. füzetek)
4. MTA MFKI: Félvezető és lumineszcencia kutatások
(MFI Közlemények, 0-1, 0-3, 0-5, 0-6, 0-9, 0-12, 0-13, 0-14 sz. füzetek)
5. Research Institute for Technical Physics of the Hungarian Academy of Sciences
Bibliography 1958-1972. Supplement I. 1972-1974.
6. Proceedings of the Int. Conference on the Physics and Chemistry of Semiconductor Heterojunctions, and Layer Structures. Vol. I-V
Akadémiai Kiadó 1971.
7. MFKI Évkönyv, 1977, 1979, 1981,
MFKI Yearbook 1978, 1980, 1982/83, 1984/85 (rövid cikkek és bibliográfia)

Megjegyzés:

A "MFKI Közlemények" és az "Évkönyvek" gyűjteményes formában tartalmazzák a beszámolóban említett eredményekről szóló szakfolyóiratokban megjelent közlemények rövid változatát, az intézeti könyvtárban hozzáférhetők.



Lézerdiódák epitaxiás növesztő laboratóriuma

Új félvezető vegyületek kutatása

Lendvay Ödön
a kémiai tudomány kandidátusa

1. Bevezetés

A mikroelektronika rohamos fejlődése során egyre több olyan problémával találkozhatunk, melyek megoldása nem lehetséges a ma már klasszikusnak számító, Si-alapú elektronikai elemekkel. Optoelektronikai alkalmazásoknál pl. a Si indirekt sávszerkezete és a tilos sáv rögzített értéke (1,107 eV 300 K-en), nagysebességű alkalmazásoknál az elektronok telítési drift-sebessége ($v < 10^5 \text{ ms}^{-1}$) szab korlátokat a szilícium gyakorlati felhasználásának.

Az első területen a nagy rekombinációs valószínűségek miatt elsősorban a direkt sávszerkezetű félvezetők, különösen a GaAs alkalmazása jelentős, de más anyagok is döntő fontosságúvá váltak a különböző hullámhossz tartományban működő félvezető fényforrások és detektorok kifejlesztése miatt. Ezeket a fényátvitel és szelektív spektroszkópia alkalmazza. Különösen az optikai hírközlés rohamos terjedése, a telefonösszeköttetések, kábeltelevíziós és egyéb szolgáltatások növekvő igényei miatt nőtt a fenti optoelektronikai elemek fontossága. A második terület; az igen nagysebességű tranzisztorok és IC-k területe újabb, mindössze néhány éve indult fejlődésnek, de jelentőségében már ma is elérte a többi vegyületfélvezető fontosságát. A szupergyors félvezető eszközök működési elve az, hogy megfelelő heteroátmenetekben a vezetési sáv diszkontinuitása miatt fellépő "kétdimenziós" (2D) elektrongáz töltéshordozóinak mozgékonyasága tiszta félvezetőkben, pl. GaAs-ben - rendkívül nagy; $10^6 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ értéket is elérhet. Az elektronok sebességének növelése rendkívüli módon kiterjeszti az elektronikai elemek (pl. tranzisztorok) működési frekvenciáját. (Összehasonlításképpen pl. Si-ban a kisterű elektronmozgékonyaság; az átlagos elektronsebesség és az alkalmazott elektromos tér hányadosának értéke $1,5 \cdot 10^4 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$, a fél-

vezető, tömbi GaAs-ben ($n \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) is csupán $5 \cdot 10^4 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$).

Mindkét területen a kifejlesztett mikroelektronikai eszközök döntő többsége heteroátmenetű eszköz, azaz egyszerű félvezetőre (pl. GaAs-re) növesztett azonos kristályrácsu, de eltérő kémiai összetételű rétegből vagy rétegekből álló szerkezet, melyre jellemző a heteroátmeneteken keresztül végbemenő töltéshordozó injekció. Az utóbbi folyamat szempontjából az anyagok kristályrácsának tökéletes illeszkedése és a megfelelő nagy ($\Delta E_g > 10\%$) tilossáv különbség egyaránt fontos. A kristályrácsok rossz illeszkedése esetén a fellépő feszültségek a határátmenet deformációjával ill. a heteroátmenet síkjában fekvő diszlokációháló keletkezésével relaxálnak. Mindkét esetben jelentősen csökken a töltéshordozók injekciós hatásfoka, ezért a heteroátmenetű eszközökben a lehetőség szerinti legtökéletesebb rácsilleszkedésre kell törekedni.

A különböző kémiai összetételű félvezetők között igen ritka a hasonló rácsállandó (a_0), gyakorlatilag csak a GaAs ($a_0 = 0,5653 \text{ nm}$) és az AlAs ($a_0 = 0,5630 \text{ nm}$) esetén valósul meg; ezért a jelenleg ismert heteroszerkezetek nagy része ebből a két anyagból, vagy ötvözetükből, az $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})\text{As}$ -ből áll. Az utóbbi, $\text{A}_x\text{B}_{1-x}\text{C}$ típusu, ún. ternér anyagokban a fizikai tulajdonságok egy része, - a rácsállandó is - közel lineárisan változik az összetétellel (Vegard szabály), ezért mód nyílik a kristályrácsok illesztésére. Nehézséget okoz, hogy egy meghatározott összetételű ternér fázishoz meghatározott a_0 és E_g tilossáv érték tartozik, és ezek ritkán felelnek meg egyidejűleg mindkét (rácsillesztési és injekciós) követelménynek. A fentiek miatt gyakori négykomponensű (kvaterner) félvezetők alkalmazása, ahol a 4 szabadsági fok (T , p és az x és y összetétel paraméter az $\text{A}_x\text{B}_y\text{C}_{1-x-y}\text{D}$ vagy $\text{A}_x\text{B}_{1-x}\text{C}_y\text{D}_{1-y}$ fázisokban) miatt egy adott rácsállandóhoz széles összetétel (ill. tilossáv) tartomány, ill. egy adott a_0 rácsállandó tartományhoz egy, meghatározott E_g érték tartozik. Ez elvben lehetővé teszi, hogy előre meghatározott tulajdonságoknak megfelelő heteroszerkezetet hozzunk létre.

A fentiek miatt az elmúlt évek során rohamosan, néhány területen a tömeggyártás szintjéig fejlődött a GaAs homo- és heteroepitaxiás eszközök előállítás, és óriási erőfeszítéseket tettek más, új félvezetők felfedezésére és alkalmazására is. Az utóbbi területen a hazai eredmények is számottevőek, ezek rövid összefoglalásával foglalkozunk a jelen munkában.

2. Félvezető antimonidok-galliumantimonid

Az új félvezető anyagok közül az egyik legfontosabb csoport az $A^{III}B^V$ antimonidok családja.

Az antimonidok már a vegyületfélvezető kutatás korai szakaszában is fontos szerepet játszottak. A szürke ónnal izoelektronos InSb-ról jósolta meg Welker a 40-es évek végén, hogy félvezető tulajdonságokat kell mutatnia. 1951-től a Siemens kutatólaboratóriumaiban állították elő az első III-V félvezetőket; közöttük az InSb-ot és az AlSb-ot. Óriási feltűnést keltett, mikor a Ge-ban tapasztalt elektronmozgékonyosság sokszorosát mutatták ki InSb-ban, és a II. és VI. oszlop elemeinek hozzáadásával igazolták Welker elképzeléseit a vezetési típus mesterséges befolyásolhatóságáról, az un. adalékolásról. 1956-ban az amerikai Bell Laboratóriummal együttműködve zónázott InSb-ban mérték az addig ismert legnagyobb elektronmozgékonyosságot; $7,6 \cdot 10^4 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ értéket.

A többi III-V anyag, elsősorban a GaAs megjelenésével az antimonidok kutatása gyakorlatilag leállt, és csak néhány éve indult ismét meg, elsősorban a GaSb vizsgálata kapcsán. A GaSb számos, előnyös tulajdonsággal rendelkezik. Olvadáspontja jóval a többi, fontos III-V anyag op-ja alatt van; mindössze 712°C szemben a GaAs 1237°C -os, a GaP 1465°C -os és az InP 1070°C -os olvadáspontjával. (Egyedül az InSb op-ja alacsonyabb a félvezetők között; 525°C .) A viszonylag alacsony olvadáspont a GaSb egykristályainak előállítását műszakilag egyszerűbbé, gazdaságilag olcsóbbá teszi, mint a többi félvezető (beleértve az elemi félvezetőket is) kristály előállítása. A többszáz fokkal alacsonyabb hőmérséklet miatt az alkalmazható berendezések egyszerűbbek, az olvadék/szilárd fázis határán ill. a növekedő kristályban keletkező termikus feszültségek kisebbek, mint pl. a GaAs esetén. Tovább növeli a különbségeket, hogy GaSb-ban a diszlokációk mozgathatók ill. sokszorozódásához szükséges kritikus feszültség csaknem egy nagyságrenddel nagyobb, mint a többi III-V anyagban. Értéke $15,8 \text{ Nmm}^{-2}$, míg pl. InAs-ben ez az érték csupán $0,7 \text{ Nmm}^{-2}$, GaAs-ben is $1,9 \text{ Nmm}^{-2}$. A fenti, két tényező következtében viszonylag egyszerűen növeszthetők diszlokációmentes egykristályok a védőolvadékos Czochralski (LEC) technológiával. Ez rendkívüli módon a GaSb javára billenti a mérleget, mivel a többi félvezetőből – még a Si-ból is – csak igen nagy műszaki-technikai

nehézségek árán lehet hasonló minőségű egykristályokat előállítani. GaAs esetén nagy mágneses terek és különleges utóhevitőket alkalmazó Czochralski rendszerekkel és adalékokkal (pl. In-al) sikerült a ρ diszlokációs-sűrűséget LEC kristályokban 500 cm^{-2} alá szorítani, kis hibasűrűségű ($\rho < 100 \text{ cm}^{-2}$) GaAs egykristályokat azonban jelenleg is csak kis átmérők ($d \sim 1 \text{ inch}$) és horizontális Bridgman technológiák alkalmazásával tudnak huzni. A két, egykristálynövesztési technológia között az a különbség, hogy míg a Czochralski kristályhuzás során a félvezető anyag forgó tégelyben levő olvadékából ellentétesen forgó magkristályra kristályosítanak a szilárd fázis lassu huzásával, a Bridgman-módszerekkel a magkristállyal érintkező, csónakban elhelyezett olvadékon egy, az olvadáspontot átmetsző hőmérsékleti gradiens halad végig. Az utóbbi eljárást GaSb-ra először az MTA Műszaki Fizikai Kutató Intézetében dolgozták ki [1,2]. A Bridgman eljárások egyszerűbbek és olcsóbbak, mint a Czochralski módszerek. Hátrányuk, hogy a keletkező kristályok átmérője általában nem kör-keresztmetszetű, ez viszont csak akkor jelent hátrányt, ha a kristályokból automatizált gyártáshoz szükséges kristálylemezeket kell kivágni. Az MFKI-ban kifejlesztett, egyszerű horizontális Bridgman módszer tette lehetővé, hogy az első magyar űrrepülés során Farkas Bertalan űrhajós először a világon GaSb kristályokat növesztett a mikrogravitáció feltételei között (Eötvös-7 kísérlet) [3]. Az űrviszonyok közötti kristálynövesztési kísérleteknek nagy az elméleti és gyakorlati jelentősége, mivel segítségükkel választhatóak szét a gravitációs tér és az egyéb hatások (felületi feszültség, elektromos vagy mágneses tér) által okozott anyagáramlások, melyek döntő szerepet játszanak az olvadékos kristálynövesztésekben. Mivel az űrtechnológiai kísérleteket az olvadéktechnológiák energiaszükséglete korlátozza, a GaSb alacsony olvadáspontja és félvezető alkalmazásai miatt ideális anyag az olvadéktechnológiák vizsgálatára. A kísérletek számos, érdekes eredményt eredményeztek; ezek közül kiemelhető a lebegő, faltól nem korlátozott kristályosodás és az utóbbi hatás miatt fellépő, a földi kristályosodásnál kedvezőbb textura és háttér-szennyező szint kialakulása. Mindkét különleges effektus döntő a félvezető kristályok előállításában. (A fenti, GaSb kísérlet fontosságát mutatja, hogy azóta az NSzK űrprogramjában is megisméltették). A földi viszonyok között MFKI technológiával növesztett egykristályok is jobb minőségűek, mint a LEC technológiával előállított GaSb.

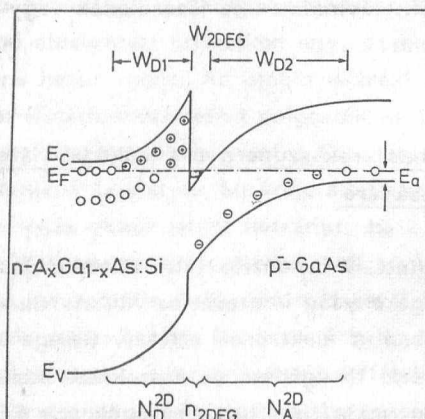
A Bridgman eljárással készült GaSb kristályokban az alacsony diszlokációs-sűrűség mellett az idegen anyagok eloszlása is egyenletesebb, mint a

LEC kristályokban. A fenti eljárás továbbfejlesztéseként az MFKI-ban egy olyan korszerű kristálynövesztő berendezést is kifejlesztettek, melyben a hőmérsékleti profil vándorlását nem mechanikus uton (az olvadékot tartalmazó csónak vagy a kályha mozgatásával), hanem mozgó részt nem tartalmazó, sokzónás reaktor számítógépes vezérlésével oldják meg. Az utóbbi rendszer várhatóan olcsó, még tökéletesebb GaSb egykristályok előállítását teszi lehetővé, és ezzel elhárul az akadály az új félvezető hazai alkalmazásai elől. Ezek az alkalmazások két irányba indulhatnak meg. A GaSb-ot felhasználhatjuk aktiv félvezetőként (foto-, és lavina-fotodiódákhoz) vagy hordozókristályként Gunn-diódák, lavina-foto- és lézerdiódák vagy nagysebességű tranzisztorok előállításához.

3. GaSb alapú heterorendszerek szupergyors működésű áramköri és optoelektronikai elemek számára

A bevezetőben említett, 2-dimenziós (2D) töltéshordozó (elektron) gázban elérhető, nagy mozgékonyság létezését az AlGaAs/GaAs heterorendszerben igazolták. A GaAs-ban az elektronok effektív tömege 0,067-szerese a szabad elektronok nyugalmi tömegének, és a szokásos adalékolási szinteken ($n \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) 300 K-en maximális átlagsebességük egy FET szerkezetben kb. 50 %-kal nagyobb, mint a hasonló Si eszközben. A GaAs elektronjainak közepes, szabad uthossza 300 K-en 0,18 μm , sebességük aszimptotikusan az $5 \cdot 10^5 \text{ ms}^{-1}$ értékhez tart. Fononokon és ionokon szóródva kis időkre és rövid távolságokra a momentum és energia transziens idők különbözősége miatt igen nagy sebességek is felléphetnek (velocity overshoot), mely az idő és távolság további csökkenésével közel ballisztikus viselkedés fellépésével jár. Ilyen esetben pl. kellően kis (szubmikronos) tranzisztor méreteknél a félvezető vegyületből készült eszközben az elektronok már ballisztikusan viselkednek, a kapcsolási idők és a működési frekvenciák akár 10-es faktorial is meghaladhatják a megfelelő Si-eszköz paramétereit. Ha a GaAs-re szélesebb tilos sávú $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ -t ($x \leq 0,3$) építünk fel, a vezetési sáv élében 0,35 eV-os, a vegyérték sáv élében 0,23 eV-os ugrás keletkezik, mely a töltéshordozókat a GaAs-re korlátozza. Donorszinteket építve be a GaAlAs-be a heteroátmenet környezetében az I. ábrának megfelelően elektronok lokalizálhatóak a GaAs oldalon, melyeket a potenciállal a heteroátmenet közvetlen szomszédságában egy vékony ($< 15 \text{ nm}$) rétegben tart; ez az ún. 2D

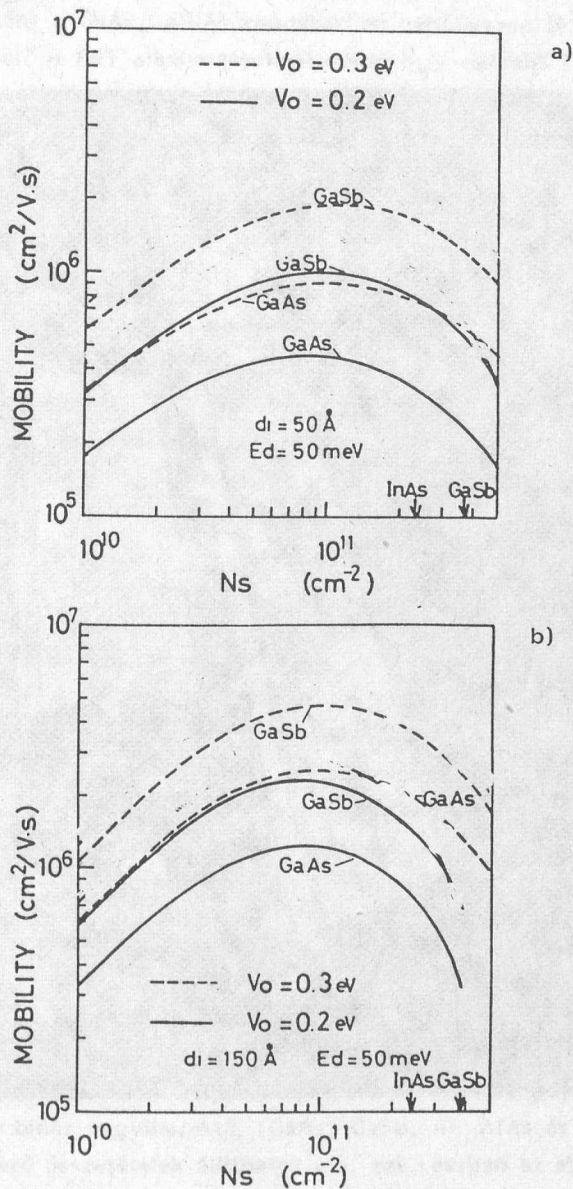
elektrongáz. Ebben az elektronok sűrűsége elérheti a 10^{12} elektron cm^{-2} értéket is. Ha a GaAs tiszta ($n \leq 10^{15} \text{ cm}^{-3}$), az elektronok mozgékony-sága jelentősen meghaladhatja az adalékolt félvezetőben elérhető értéket. A szobahőmérsékleten már 1-3 μm -es kapuhosszak esetén is a fenti hete-roátmenetből készült FET-ben az elektronok átlagos tranzit-sebessége el-éri a $2 \cdot 10^5 \text{ ms}^{-1}$ értéket. A kapuméreteket a ballisztikus méretekig csök-kentve alacsony hőmérsékleten ez tovább növelhető, egészen a $\mu > 10^6 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ értékekig.



1.ábra: Kétdimenziós (2D) elektrongáz keletkezése GaAs/GaAlAs heteroátmenet mentén

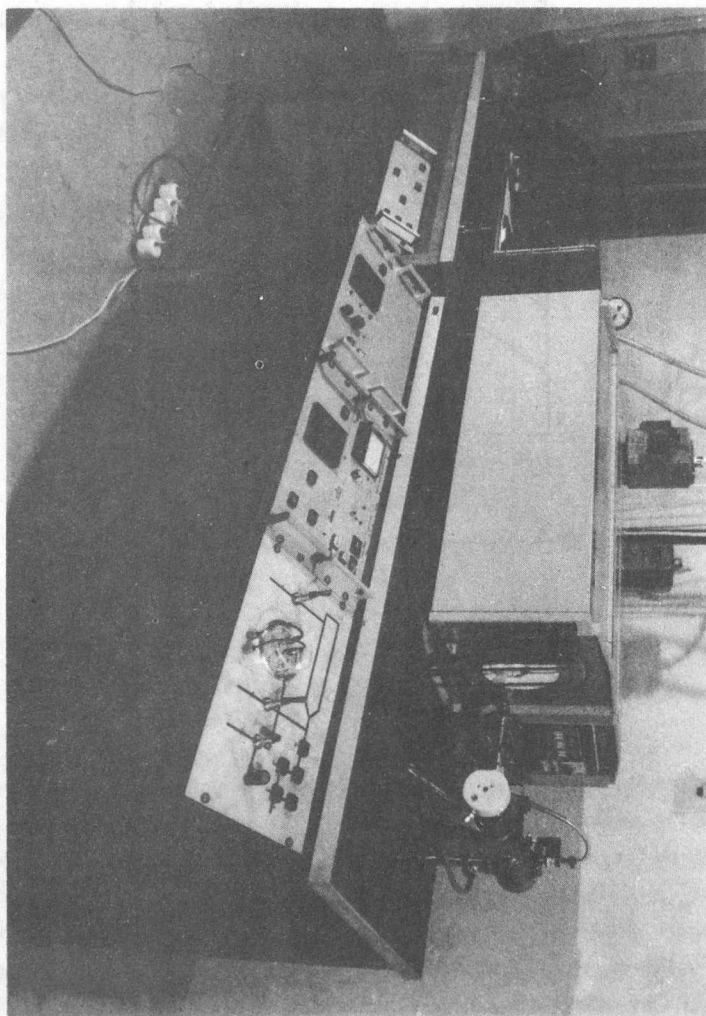
A GaAs/GaAlAs rendszerben elért mozgékonyságok nem jelentenek fel-ső korlátot, mivel a fenti rendszerben a mozgékonyság maximális értékét az ionok által okozott szórás befolyásolja. Ez durva közelítésben az elektronok effektív tömegétől és a közeg sztatikus dielektromos állandójától; $\epsilon_0^2 / (m^x)^2$ -től függ. Japán kutatók már 1985-ben felhívták arra a figyelmet, hogy a III-V anyagok között a GaSb heterorendszerekben magasabb mozgékony-ságok is elérhetőek, mivel az elektronok effektív tömege kisebb, ($m^x/m=0,042$, szemben a GaAs 0,067-es értékével), a dielektromos állandó pedig nagyobb, mint a GaAs alapu rendszerekben [4]. (15,7 GaSb-ban, 12,9 GaAs-ben). Elméleti számítások azt mutatták, hogy a vezetési sáv 0,3 ill. 0,2 eV-os ugrása esetén GaSb-ban elérhető a $6 \cdot 10^6 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ mozgékonyság is 0 K-re extrapolálva. A 2. ábra a mozgékonyság elméleti változását mutatja GaSb

és GaAs alapu rendszerekben a kétdimenziós elektrongáz koncentrációjának a függvényében.



2. ábra: GaSb/ternér és GaAs/GaAlAs heteroátmenetek mentén fellépő 2D elektronsűrűség és mozgékonyaság elméleti kapcsolata [4] alapján
a) 5 nm "spacer" réteg esetén b) 15 nm "spacer" réteg esetén

Folyadék epitaxiás növesztő berendezés



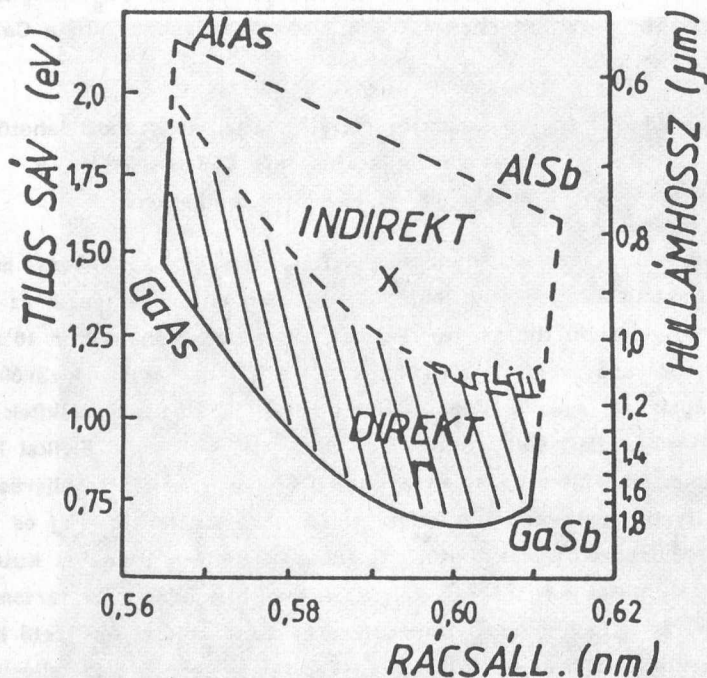
Az ábrának megfelelően hasonló feltételek között (15 nm-es, a tiszta félvezetőt és az injektáló, széles tilos sávu ötvözetet elválasztó ötvözet, ún. "spacer" esetén) a GaAs/GaAlAs rendszerben néhányszor $10^5 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ érték érhető el. A FET alkalmazásoknál döntő $N_s \mu$ szorzat (N_s réteggkoncentráció) a GaSb-os rendszerben 1,8 - 2,2-szer magasabb, mint a GaAs alapu rendszerben.

Részletesen megvizsgálva a barrier nagyság által megszabott lehetőségeket, a szupergyors tranzisztorok fejlesztésére a GaSb/AlGaSb, a GaSb/GaInSb és a GaSb/GaAsSb rendszer látszik alkalmasnak.

A fenti heterorendszerekben döntő jelentőségű a "spacer" réteg, melynek kellően tisztának és vékonynak kell lennie, anyaga megegyezik az erősen adalékolt, szélesebb tilos sávu injektáló rétegével. Néhányszor 10 nm nagyságrendjébe eső vastagságú rétegeket korábban csaknem kizárólag csucstechnológiákkal; molekulásugár epitaxiával (MBO) vagy fémalkilek termikus bontásával (MO CVD) állították elő. Az MTA Műszaki Fizikai Kutató Intézetében sikerült viszonylag egyszerű, folyadékepitaxiás eljárást kifejleszteni ilyen rétegvastagságú félvezetők növesztésére is [5] és megindult a GaSb hordozón kialakítható, rácsillesztett heteroátmenetek kutatása. A jelenlegi kutatás két irányba folyik; a kvantumgödör mérettartományba eső vékonyréteg technológia kifejlesztése és az előállított félvezető heterorendszerek kutatása irányába. A folyadékepitaxiás technológia teljesítőképességének vizsgálatára a jól ismert heterorendszerek, - pl.a GaAs-GaAlAs rendszer - kedvezőbb, mivel ebben az anyagi tulajdonságokról számos adat áll rendelkezésünkre, ezért a módszer kutatása jelenleg GaAs/GaAlAs szuperrácsok előállítása kapcsán folyik. Az új félvezető heterorendszerek közül az MFKI-ban a GaAsSb és a GaAlAsSb rendszerek tanulmányozásában érték el eredményeket; ezek a rendszerek a nagymozgékonyoságú töltéshordozók, a 2D elektrongáz lehetséges előállítása mellett elsősorban optoelektronikai alkalmazásai miatt fontosak.

A GaAsSb és GaAlAsSb állapotábrája peritektikus jellegű. Gyakorlatilag csak az alkotó binér vegyületektől (GaAs, GaSb, ill. AlAs és AlSb) nem tulságosan eltérő összetételek állíthatók elő, ezt részben az MTA MFKI-ban korábban elért eredmények igazolják [6, 7]. A fenti, két anyagból részben lézerdíódák, részben napelemek készíthetők.

A 3. ábrának megfelelően a fenti anyagpár viszonylag széles összetétel és rácsállandó tartományban alkalmas heteroátmenetek előállítására.



3. ábra: $a_0 - E_g$ diagram az $Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$ rendszerben

A jó injekciós hatásfokhoz szükséges $\Delta E_g \sim 0,3 - 0,4$ eV érték GaSb hordozó esetén viszonylag könnyen biztosítható mind GaAsSb, mind GaAlAsSb-al, a ternér azonban nem rácsilleszthető a GaSb hordozóhoz, ezért vagy ternér/kvaterner, vagy GaSb/GaAlAsSb rendszert kell használnunk tranzisztor vagy optoelektronikai fejlesztés céljára. Az utóbbi esetben GaAs hordozó is alkalmazható, ha változó összetételű átmeneti réteget építünk be a hordozókristály és a félvezető eszköz aktiv tartománya közé. A MFKI-ban a fenti rendszerből állítottak elő kettős, heteroepitaxiás szerkezeteket, melyekben GaAs hordozóra változó összetételű (graded) GaAsSb réteget, erre pedig rácsillesztett n-GaAlAsSb/GaAsSb/p-GaAlAsSb rétegeket növesztettek.

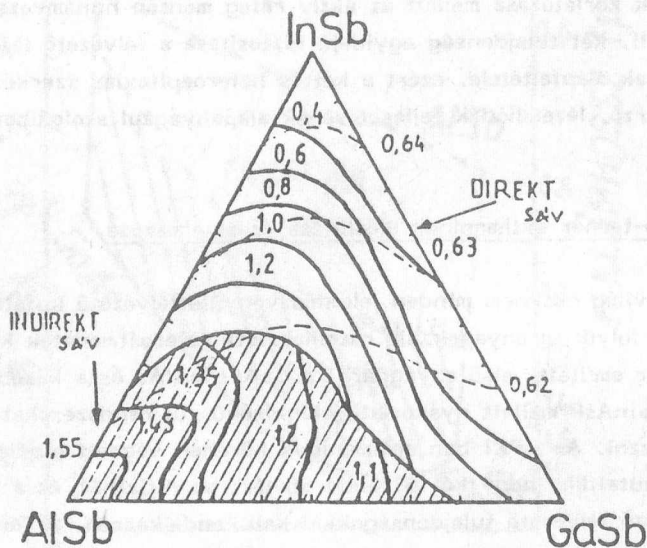
A rácsillesztési és injekciós feltételek elméleti vizsgálata alapján a fenti, kettős heteroepitaxiás rendszerben az aktiv $\text{GaAs}_y\text{Sb}_{1-y}$ rétegre teljesülnie kell az $y > 0,75$ feltételnek, ezt kísérletileg is sikerült biztosítani. Az elméleti vizsgálatok szerint a négykomponensű, injektáló rétegek nagyobb tilos sávja mellett törésmutatójuk kisebb, mint a GaAsSb rétegé, azaz a töltéshordozók korlátozása mellett az aktiv réteg mentén hullámvezetés is felép. A fenti, két tulajdonság egyidejű biztosítása a félvezető lézerdiodák előállításának alapfeltétele, ezért a kettős heteroepitaxiás szerkezet $1\text{ }\mu\text{m}$ körül sugárzó, lézerdiodák fejlesztésének alapanyagául szolgálhat.

4. Pseudo-ternér antimonidok előállítása és alkalmazása

Bár a világ csaknem minden jelentős vegyületfélvezető kutatóhelyén lázas munka folyik új anyagok ill. rácsillesztett heteroátmenetek kifejlesztésére, a már említett, első anyagpár; a $\text{GaAs}/\text{GaAlAs}$ és a később felfedezett $\text{InP}/\text{GaInAsP}$ mellett gyakorlati jelentőségű, új rendszereket nem sikerült felfedezni. Az MFKI-ban antimonidok körében végzett elméleti vizsgálatok azt mutatták, hogy két pseudo-ternér; az AlGaInSb és a GaPaSb igen kedvező félvezető tulajdonságokkal kell rendelkezzen. A fenti fázisokra jellemző, hogy a szfalerit egy-egy alrácса mindhárom iont (Al-t, Ga-ot és In-ot, ill. P-t, As-t és Sb-t) tartalmazza. Ezeket a félvezetőket korábban még nem állították elő, homogén fázis formájában történő előállításukat először az MFKI-ban sikerült megvalósítani [8-10]. Mindkét anyagban az egy-egy alrácсban helyet foglaló ionok mérete jelentősen különbözik, ezért az ionok véletlen eloszlásra való törekvése (keveredési eutrópiája) mellett korrelációs (a rácstorzulást kompenzáló) járulékok is fellépnek.

Az AlGaInSb rendszerben elméletileg meghatározható T_c kritikus hőmérséklet (mely felett a komponensek korlátlanul elegyednek, és a Raoult-féle elegyedési szabály érvényes) viszonylag nagyon alacsony érték; mindössze $205\text{ }^\circ\text{C}$. Ez, valamint a rendelkezésünkre álló kísérleti adatok azt mutatják, hogy a rendszer állapotábrájában nincsenek elegyedési korlátok, és tetszés szerinti x és y összetétel paraméter felléphet az $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{Sb}$ rendszerben. A különböző összetételű fázisokon végzett vizsgálatok azt mutatták, hogy a 4. ábrának megfelelően mind direkt, mind indirekt sávú félvezetők előállíthatóak. Tömbi anyagok az Al erős szegregációja miatt nem keletkez-

nek homogén összetétellel, heteroepitaxiás rétegek formájában azonban jó minőségű, azonos összetételű rétegek növeszthetők GaSb hordozókristályokon [11], melyeken a rácsillesztetlenség (misfit) viszonylag kicsi; 0,5 % nagyságrendű.



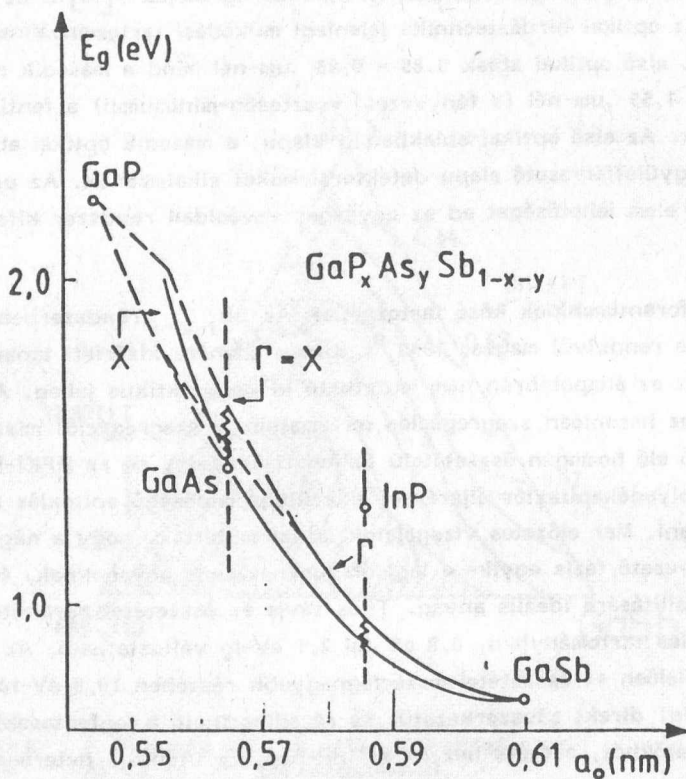
4. ábra: A tilos sáv és a rácsállandó változása az $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{Sb}$ rendszerben.
(A vonatkozott összetétel mezőben a tilos sáv indirekt jellegű)

A fenti rendszerben érdekes kristálynövekedési anizotrópiát sikerült megfigyelni; iker tartományokat tartalmazó hordozókristályok esetén poláros $\langle 111 \rangle$ ikerkristályok egyikén epitaxiás növekedés, másik felén a növekedés teljes gátoltsága lépett fel. A két, ikerhatárral elválasztott felület között az a különbség, hogy ellentétes; Ga vagy Sb atomok borítják. Hasonló, érzékeny reagálást a kémiai mikrokörnyezetre kristálynövekedésben más rendszereken eddig nem sikerült kimutatni [12, 13]. A folyadékepitaxiával előállított kvaternér összetételek a 4. ábrán bemutatott összetétel-mező AISb csúcsa környezetében helyezkedtek el, de – szemben az AISb-vel – nagyfokú stabilitást mutattak, ami a gyakorlati felhasználást is lehetővé teszi. Az MFKI-ban sikerült megoldani a fenti fázis adalékolását és p-n átmenet növesztését is.

A keletkezett diódastruktúra optikai vizsgálata azt mutatta, hogy a GaSb/p-AlGaInSb/-n-AlGaInSb rendszerből szélessávú fotodetektorok állíthatók elő, melyek válasza 0,7 μm -tól 1,7 μm -ig terjed [14]. Ez a tartomány az optikai hírdástechnika jelenlegi működési tartománya, mivel mind az un. első optikai ablak 0,85 - 0,95 μm -nél mind a második optikai ablak 1,3 - 1,55 μm -nél (a fényvezető veszteség-minimumai) a fenti tartományba esik. Az első optikai ablakban Si-alapu, a második optikai ablakban Ge vagy vegyületfélvezető alapu detektorelemeket alkalmaznak. Az új optoelektronikai elem lehetőséget ad az egységes vevőoldali rendszer kifejlesztésére.

A foszforantimonidok közé tartozó $\text{GaP}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-x-y}$ rendszerben T_c elméleti értéke rendkívül magas; 1990 $^\circ\text{C}$, ennek ellenére kísérleti tapasztalataink szerint az állapotábrán nem mutatható ki pertitektikus jelleg. Az AlGaInSb-hoz hasonlóan szegregációs folyamatok (P szegregáció) miatt itt sem állítható elő homogén összetételű térfogati kristály, de az MFKI-ban kifejlesztett folyadékepitaxiás eljárással sikerült jó minőségű epitaxiás rétegeket növeszteni. Már előzetes vizsgálatok is azt mutatták, hogy a négykomponensű félvezető fázis egyike a legjobb lumineszcens anyagoknak, és fényforrások előállítására ideális anyag. Tilos sávja az összetétel paramétereiktől függően széles tartományban, 0,8 eV-től 2,1 eV-ig változtatható. Az 5. ábrának megfelelően az összetétel-mező legnagyobb részében (0,8 eV-től 1,6-1,7 eV-ig) direkt sávszerkezetű, és rácsilleszthető a legfontosabb vegyületfélvezetőkhez, a GaAs-hez és az InP-hoz. Ez utóbbi a heteroepitaxiás rendszerek szempontjából alapvető jelentőségű. Az első esetben a rendszer fizikai tanulmányozása azt mutatta, hogy a rácsillesztett összetételekhez tartozó tilos sáv 5-20 %-kal szélesebb, mint a GaAs tilos sávja, a második esetben a kvaternér keskenyebb tilos sávú, mint az InP. A fentiek miatt lehetőség van n-GaPAsSb/GaAs/p-GaPAsSb, ill. n-InP/GaPAsSb/p-InP kettős heteroepitaxiás szerkezetek kialakítására. Az első esetről sikerült kimutatni, hogy a széles tilos sávú pszeudo-ternér törésmutatója alacsonyabb, mint a GaAs-é, és ezért a töltéshordozó injekció mellett a rekombináció során keletkező fotonok is a közepső, un. aktív rétegben tarthatóak. A rácsillesztési feltétel mellett ezek az utóbbi tényezők döntőek egy új félvezető lézercsalád kifejlesztése szempontjából.

Az MFKI-ban megindult kísérletek eredményeként folyadékepitaxiás (LPE) módszerekkel sikerült a GaAs/GaPAsSb kettős heteroátmenetet előállítani.



5. ábra: A tilos sáv változása a_0 -al a $\text{GaP}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-x-y}$ rendszerben

A fenti munka során egyrészt a rácsillesztettséget, másrészt ΔE_g lehető legnagyobb értékét kellett biztosítani a P tartalom növelésével. Az LPE kísérleteket egy új, MFKI-ban kidolgozott eljárással hajtottuk végre, mely igen vékony (20 nm) rétegek, ill. szuperrácsok növesztésére is alkalmas [15]. A fenti rendszerben a hordozókristály mindkét oldalára egyidejűleg nő epitaxiás réteg. Az egyik oldalon féligvégtelen olvadáforrásból, a

másik oldalon vékonyrétegből nő réteg, mivel a hordozó a növesztés során két félre vágja az olvadékforrást. A kísérletek részletes analízise azzal a meglepő eredménnyel szolgált, hogy azonos olvadékforrásból, azonos terminus program (tuhítás, hűtés ill. a kettő kombinációja) hatására eltérő összetételű szilárd fázis nő fel GaAs hordozó két oldalára, ami csak az anyagtranszport eltérő jellegéből eredhet. Hasonló hatást a rendkívül széleskörű LPE kutatások ellenére sem figyeltek meg korábban, mivel a szigorúan azonos kísérleti feltételek csak a MFKI technológiában érhetőek el.

Röntgen (rocking curve) vizsgálatok azt mutatták, hogy a heteroepitaxiás rendszerben sikerült jó rácsilleszkedést elérni, az illesztetlenség (misfit) mindössze 0,04 - 0,09 értékű. A megfelelő eszköz (kontaktált, hordozó oldalán vékonyított) mintán áramot át bocsátva a kettős heteroepitaxiás diódaszervezetben intenzív, 0,9 μ m-es sugárzást figyeltünk meg. Ez egyértelműen bizonyítja, hogy az új kvaterner félvezető felhasználásával lehetőség nyílik egy új GaAs félvezető lézercsalád kifejlesztésére.

A fenti eredmény jelentőségét az mutatja, hogy az elmúlt 15 évben hasonló eredményt a GaAs lézerfejlesztésben a világ egyetlen, más laboratóriumában sem sikerült elérni.

Irodalom

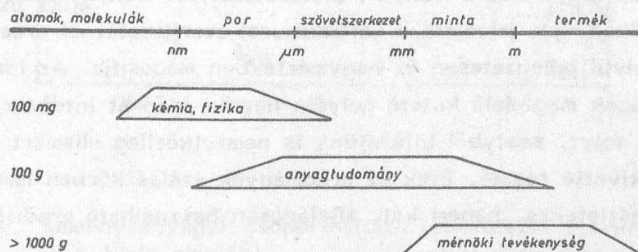
1. M.Hársy, T.Görög, E.Lendvay és F.Koltai:
J.Cryst.Growth 53 234 (1981)
2. F.Koltai, M.Hársy és E.Lendvay:
Cryst. and Technol. 18 1513 (1983)
3. E.Lendvay, M.Mársy, T.Görög, I.Gyuró, I.Pozsgai, F.Koltai, J.Gyulai,
T.Lohner, G.Mezey, E.Kótai, F.Pászti, V.T.Hrjapov, N.A.Kultchinsky
és L.L.Regel:
J.Cryst.Growth, 71 538 (1985)
4. Y.Takeda, M.Ichimura és A.Sasaki:
Japan.J.Appl. Phys. 24 L-455 (1985)
5. E.Lendvay, T.Görög és V.Rakovics:
J.Cryst.Growth 22 616 (1985)
6. E.Lendvay, T.Görög és A.L.Tóth:
"Galliumarsenide and Related Compounds"
Ed. H.W. Thim, conf.Ser. The Inst. of Physics, London, 1981.
7. E.Lendvay:
J.Cryst. Growth 53 591 (1981)
8. E.Lendvay:
Electronics Lett., 18 407 (1982)
9. E.Lendvay:
J.Cryst.Growth 60 447 (1982)
10. E.Lendvay:
Czech.J.Phys. B-34 479 (1984)
11. E.Lendvay, V.A. Gevorkyan, L.Petrás, I.Pozsgai, T.Görög és
A.L.Tóth:
J.Cryst.Growth, 73 63 (1985)
12. E.Lendvay, L.Petrás és V.A.Gevorkyan:
Acta Phys.Hung. 57 319 (1985)
13. E.Lendvay, L.Petrás és V.A.Gevorkyan:
J.Cryst.Growth 71 317 (1985)
14. Lendvay Ö., Lőrinczy A., Hársy M., Hoffmann Gy. és Hülber E.:
Finommech.-Mikrotechnika 24 65 (1985)
15. E.Lendvay, T.Görög és V.Rakovics:
J.Cryst.Growth 72 616 (1985)
16. E.Lendvay és T.Görög:
J.Cryst.Growth 79 928 (1986)

Anyagkutatás

Bartha László
a kémiai tudomány doktora

Tények és tendenciák

Az anyagtudomány fogalom 20-25 évvel ezelőtt jelent meg szilárdtes-
teken végzett sokoldalú kutatási tevékenység összefoglaló megnevezéseként.
Ilyen értelemben tehát az anyagtudomány nem önálló diszciplína, hanem kü-
lönöző kutatási ágak - fizika, kémia - együttes alkalmazását jelenti vala-
mely meghatározott területen. Az 1. ábra egyszerű paraméterek - méret és
tömeg - alapján kísérli meg elhelyezni az anyagtudományt a természettudo-
mányok és a mérnöki, műszaki tevékenység között.



1. ábra:

Ez meglehetősen formális, azonban kétségtelenül sok mindent kifejez az anyagtudomány jellegéből. Tetszetős lenne az analógia a kutatás-fejlesztés-termelés szakaszaiból álló innovációs láncsal, amely analógia alapján az anyagtudomány a fejlesztés szakaszának felelne meg. Ez az analógia természetesen nem alkalmazható ilyen egyszerű módon, azonban feltétlenül ki-fejezi az anyagkutatás egyik lényeges elemét, az alkalmazási orientáltságot.

Kifejezi azt a tényt, hogy az anyagok tulajdonságainak vizsgálata nem kizárólag a megismerést szolgálja, hanem valamilyen igényt igyekszik kielégíteni, vagy pedig fölkelteni, ennek megfelelően törekszik új tulajdonságok létrehozására. Mindenképpen hozzátartozik így az eredményes anyagkutatás fogalmához az anyagok előállításának képessége, azaz megfelelő gyártó-eszközök, illetve technológiák kifejlesztése is.

Az új tulajdonságu anyagok megjelenése bizonyos ártértékelődést is eredményez, ami együtt jár földünk nyersanyag készleteire vonatkozó prognózisok ártértékelésével is. Ez a tény a nyersanyag árak, különösen a klaszikus nyersanyag árainak piaci ingadozásaiban is nyomon követhető.

A fentiek alapján úgy ítélem meg, hogy intézetünk lényegében megalakulása óta, tehát 30 éve anyagkutató intézet, miután tevékenysége nagymértékben kielégíti a megfelelő kritériumokat.

Előadásomból, amely a fémkutatási egység keretében végzett tevékenység egy részére szorítkozik, valamint bizonyára a többi előadásokból is kiderül, hogy ilyen jellegén az intézet a jövőben sem kíván változtatni.

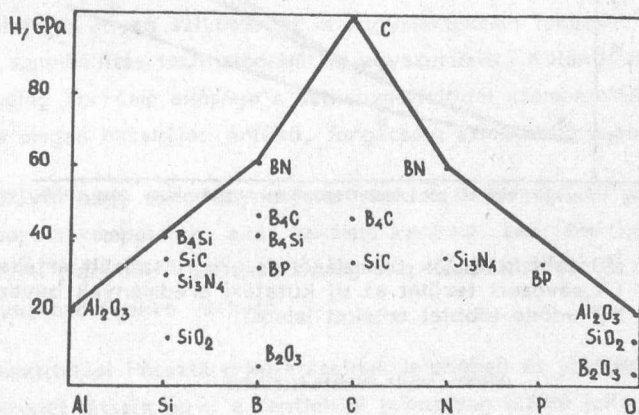
A MFKI fémkutatásának gyökerei a volframfém kutatáshoz nyulnak vissza, amelynek célja elsősorban az izzószál gyártására alkalmazott adalékos volframfém sajátos szerkezetének és ezzel járó magas hőmérsékleti creep tulajdonságának megértésére irányult évtizedeken át. Néhány elem igen kis koncentrációban való jelenléte a volframhuzal szerkezetét és creep tulajdonságát rendkívül jellegzetesen és nagymértékben módosítja. Az iparilag is érdekelt országok megfelelő kutató helyein hosszú időn át intenzív és eredményes kutatás folyt, amelyből intézetünk is nemzetközileg elismert módon és mértékben kivette részét. Ezek az eredmények széles körben ismertek, ezért itt nem a részletekre, hanem két, általánosan használható eredményre utalnék:

1. a lágy második fázisokkal történő szilárdítás megértése,
2. a matrix és kémiai környezete közötti kémiai kölcsönhatás, ezen belül is elsősorban a belső oxidáció, valamint a kémiaileg indukált átkristályosodás szerepének jobb megismerésére. E folyamatok, de különösen az utóbbi jelentős, irreverzibilis tulajdonság-romlást eredményeznek, és elsősorban akkor éreztetik hatásukat, ha az anyag jellegzetes méretei

(szemcseméret, drót-átmérő, lemezvastagság, stb.) összemérhetők a használati hőmérséklet és idő alapján várható diffúziós uthosszal.

A W kutatás kísérleti feltételeinek megvalósítása magas hőmérsékleti vizsgáló technikák kifejlesztését kívánta, amelyek lehetőséget adtak más nagyolvadáspontú fémek (Mo, Nb, Ta) és vegyületek vizsgálatára. Ezzel a lehetőséggel élve kezdtünk előbb a W karbid (keményfémek), majd a W alakítás vizsgálata során a polikristályos gyémánt – mindkettő kiváló szerzőanyag – tanulmányozásához. Végül – hasonlóan számos nemzetközi kutatóhelyhez – egyéb kemény anyagok, így a kerámiák kutatásához.

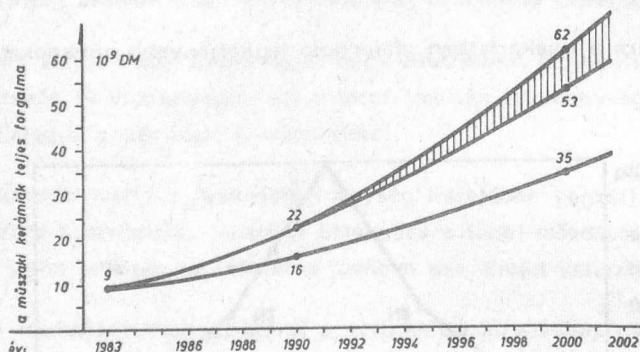
A 2. ábra a gyakorlatban előforduló legkeményebb anyagokat mutatja be.



2. ábra: Kemény anyagok csoportosítása összetevőik szerint (P.S.Kisly alapján)

Az ábra kapcsán két tényre kell figyelni. Az egyik, hogy két anyag, a gyémánt és a bornitrid, különösen nagy keménységével kitűnik a többiek közül. Ezeket szuperkemény anyagoknak nevezzük. Valamennyi anyagra igaz az ábra szerint, hogy ezek a könnyű elemek kombinációiként jönnek létre, azaz ezek a nagy keménységű kerámiák nem a hagyományos agyag-ásvány kerámiáknak megfelelő vegyületek. Előállításuk általában bonyolult.

Tulajdonságaik leírását tekintve az irodalomban nagy eltérések tapasztalhatók. Ez egyrészt abból adódik, hogy összetételük kismértékű változása is jelentős tulajdonságváltozásokat okozhat. Különleges tulajdonságaik és ezzel összefüggő nagy használati értékük miatt – megkülönböztetésként a hagyományos kerámia fogalomtól – műszaki kerámiáknak szokás őket nevezni. A 3. ábra a műszaki kerámiáknak a termelési értékben észlelhető trendjeit, az 1. táblázat pedig a legfejlettebb gyártó országok néhány felhasználási területre vonatkozó arányait mutatja



3. ábra: Műszaki kerámiák termelésének prognosztizált értéke
(A sávozott terület az új kutatási eredmények bevezetéséből adódó többlet értéket jelenti)

Műszaki kerámia termékek az USA-ban

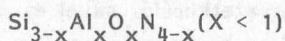
	Millió \$				
	1980	1985	1990	1995	2000
Elektronikai termékek	1000	1500	3800	6600	11000
Szerszám anyagok	50	60	450	500	900
Abrazív anyagok	20	45	200	400	600
Motoralkatrészek	0	80	700	2600	7000
Biokerámia	0	0	10	20	30
Különböző anyagok	2		15		70

Műszaki kerámiái termékek Japánban

	Millió \$			
	1981	1982	1985	1990
Elektronikai termékek	1000	1200	2000	2800-3300
Motoralkatrészek /gyújtógyertya nélkül/	0	230	500	1200-4000
Biokerámia	10			400

1. táblázat

A kerámiák sokfélesége egyetlen kutató helyen sem teszi lehetővé az anyagok széles körére kiterjedő tevékenységet. Intézetünk néhány nitrid-kerámia kutatását vette programjába, egyrészt azoknak a műszaki perspektívái, másrészt a KGST komplex programjában is hangsúlyozott jelentősége miatt. A legnagyobb súlyt a Si_3N_4 alapú, kombinált kerámiákra, a sialonokra helyezzük, amelyek összetétele



általános képlettel írható le. A képletből kitűnik, hogy a Si és az N atomok bizonyos határig Al és O atomokkal helyettesíthetők. Ez a változtatható összetétel az anyag tulajdonságainak széles sávban történő változásával jár együtt, ami különböző területek igényeinek kielégítésére lehet alkalmas. Az üvegszerű kötőfázisok alkalmazása további variációs lehetőségeket enged meg, amellett az anyag szívósságát is nagymértékben fokozza. Kötőfázis alkalmazása az előállítás technológiáját is egyszerűsíti. Különösen szembeötlő a sialon meleg korrózió állósága a szilíciumnitriddel szemben. A kutatás műszaki célja magas használati értékű, forgácsoló szerszámanyagok előállítása.

Rendkívül nagy tudományos és műszaki érdekességű és perspektívájú anyagcsoport a kompozitok, akár kerámia-kerámia, akár fém-kerámia változatban. Ilyen irányban kutatásaink még alig kezdődtek, a téma kibontakozása a következő évekre várható.

A Fémkutatási Főosztály kutatásainak jelenében és jövőjében is meghatározó szerepet játszik egy, a fentiekől jelentősen eltérő jellegű terület: a fémlegegységek - általában másodlagos nyersanyagforrások, vagy esetleg érc- komponenseinek gazdaságos, környezetkimélő módon történő szeparálása és visszanyerése. E tulnyomórészt hidrometallurgiai módszerek jelentős kémiai kutatást és eszköz- ill. eljárás-fejlesztést igényelnek.

Ez a tevékenység a korábbi évek egyik kutatási területére, a vizes oldatok szerkezetének, a kialakuló egyensúlyoknak a vizsgálatára nyulik vissza.

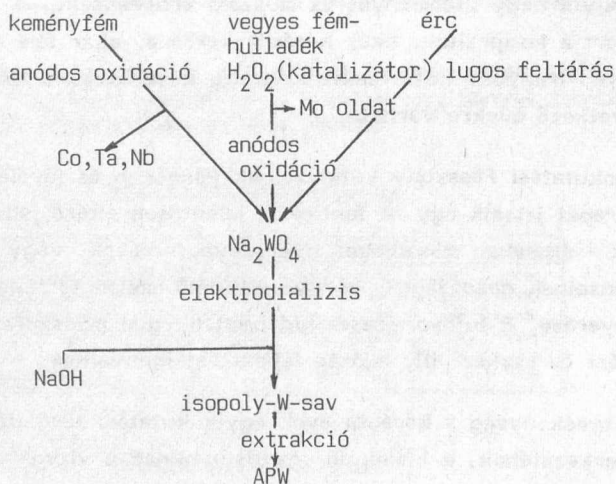
A különböző, W tartalmú források feldolgozásának, a W szeparálásának és egységes alapanyaggá történő feldolgozásának példáján a munka elvei jól megérthetők s a további példák érzékeltetik azt a nagy változatossá-

got, amivel ezek a módszerek rendelkeznek.

Példánkban a cél az, hogy nagytisztaságú W vegyületeket nyerjünk vissza különböző W tartalmú forrásokból. Ilyen források lehetnek keményfém hulladék, valamint vegyes fémhulladékok, főleg az izzólámpagyártásból, továbbá maga a W érc. Az első lépés – miután hidrometallurgiai módszerről van szó – minden esetben a feloldás. Az anódos oxidáció és a H_2O_2 -vel történő oxidáció rendkívül környezetkímélő, mivel az oxidáló ágens mellékterméket nem hoz létre. Kidolgoztuk a WC tartalmú keményfémek anódos oxidációjának módszerét és Na_2WO_4 -ot szeparáltunk belőle.

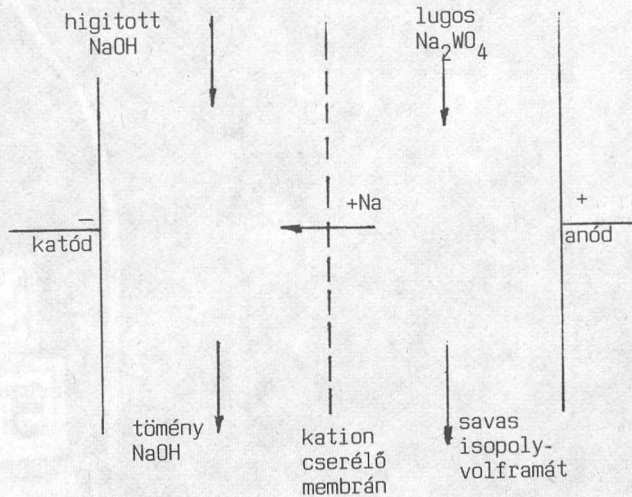
W-Mo tartalmú vegyes fémhulladékok esetén a Mo-t H_2O_2 -dal történő, katalitikusan szabályozott oxidációval választjuk el. A visszamaradt W fémet többféle módon, így például anódos oxidációval átalakíthatjuk Na_2WO_4 oldattá.

A W érceket NaOH-val lehet főtárni és ennek eredménye is Na_2WO_4 oldat. A 4. ábra összefoglalóan mutatja be a fenti műveleteket.



4. ábra: Különböző W-tartalmú nyersanyagok feldolgozási lehetőségei W visszanyerése céljából

Az Na_2WO_4 oldatot majd ammóniumparavolframáttá (APW) kell alakítani, mivel a W gyártásnak ez az általánosan elfogadott alapanyaga. A szokásos módszer a kénsavval történő W-sav lecsapás, majd a W-savnak ammóniával APW-tá történő alakítása. E közben jelentős mennyiségű, környezetszennyező Na_2SO_4 keletkezik. Lényeges technológiai feladat ennek a környezet-szennyező sóképződésnek az elhárítása. Ez elektrodialízissal történhet az alábbi séma szerint.

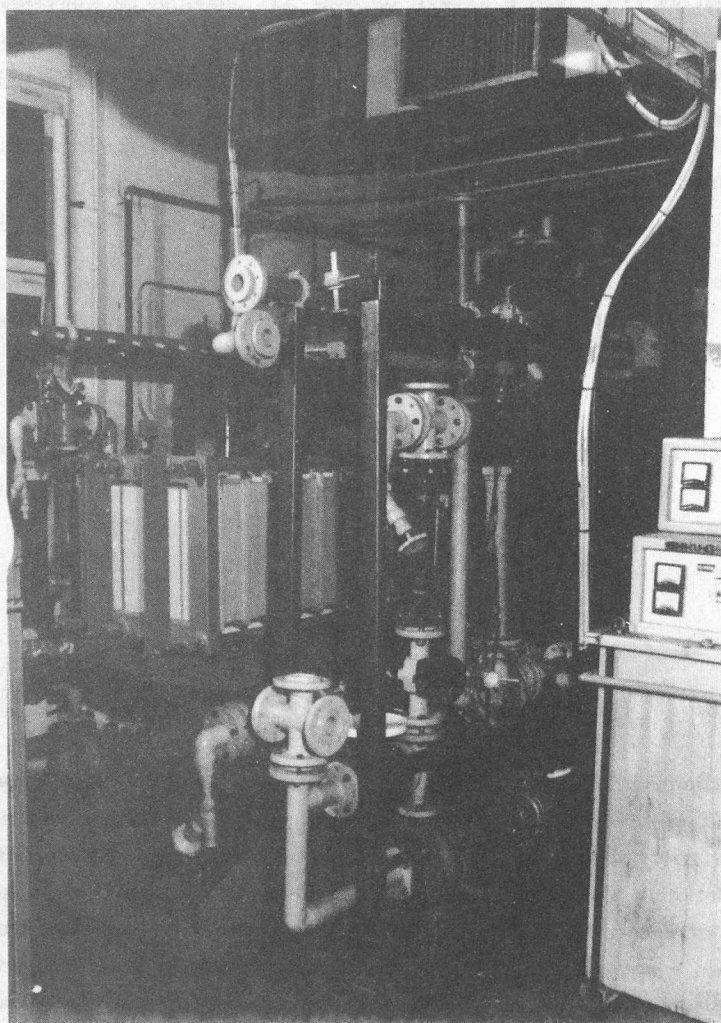


5. ábra: Elektrodializátor cella működési sémája

A kationcserélő membránnal elválasztott cella lehetővé teszi a kationok átáramlását és koncentrálódását a katódtérbe, míg az eredeti beáramló térben az oldat Na^+ ion tartalma fokozatosan csökken. Végül izopolivolframsav (IPW) keletkezik több-kevesebb Na-ion tartalommal. A katódtérben koncentrált NaOH-ot újra hasznosítjuk W-oldására, így – az energia ráfordításától függően – egy körforgás során 85-90%-át nyerhetjük vissza az eredeti Na tartalomnak. Ennyivel csökken a képződött környezetszennyező sótömeg, illetve ilyen mértékű anyagmegtakarítást érhetünk el.

A keletkezett IPW-t szerves oldószeres extrakcióval tisztíthatjuk. Ennek elve a következő:

Szerves komplexképző vegyületek, így pl. hosszú szénláncú aminok specifikusan szerves fémvegyületeket képeznek a volframmal meghatározott



Elektrodializáló berendezés volfrám alapanyag környezetkímélő gyártásához

körülmények (pH, hőmérséklet) között. E vegyületek 100-1000-szeresen oldékonyabbak a megfelelő szerves oldószerben, mint a vízben, ezért a vizes fázisból átvihetők a vízzel nem elegyedő, szerves fázisba, amely a vizes fázistól a fajsúlykülönbség alapján egy ülepítőben elválik. Más körülmények között (pl. ammóniás közegben) ez a szerves fémvegyület elbomlik és vizoldékony APW jön létre, amely így vízbe visszaoldható és kristályosítható. A felszabadult reagens és az oldószer ismételtlen fölhasználható új IPW mennyiség átalakítására.

Fenti elv megvalósítására mixer-settler típusú extraktorokat hoztunk létre különböző méretekben.

Az egyes egységekből tetszés szerinti számot kapcsolhatunk egymás után és az így kialakított, folyamatosan üzemelő rendszerben különböző elválasztási kombinációkat valósíthatunk meg.

A fenti példával egy gazdaságos, környezetkimélő technológia alaprendszerét irtuk le a volfram esetére. Ez a rendszer azonban igen általánosan használható. Az elektrodializist sóknak összetevőikre történő bontására nemcsak a nátriumvolframát, hanem elvileg minden más só esetében is alkalmazhatjuk. Megfelelő elrendezéssel vizek sómentesítése is megvalósítható. Az extráció használhatósága még általánosabb. Specifikus szerves reakciókat találhatunk a különböző fémekre, és ennek alapján ezeket környezetüktől nagy biztonsággal elválaszthatjuk.

A fenti elveket, illetve módszereket sikeresen használhatjuk galvániszapok Cu, Zn és Ni komponenseinek szeparálására, Co és Ni, Ta és Nb stb. elválasztására. Kutatásainkat és az eredmények alkalmazását tovább folytatjuk. Perspektivikusnak tűnik a Cd és Ni elválasztása az akkumulátor gyártó ipar számára, a Ga elválasztása Al-től a hazai Ga termelés kapacitásának és gazdaságosságának fokozása érdekében, NaOH visszanyerése textilipari hulladék oldatokból, stb.

A fent vázolt elveket igen sok fémelegy esetében alkalmaztuk és további rendszerekre történő kidolgozásuk van folyamatban azzal a célkitűzéssel, hogy a kutatás eredményeit a műszaki alkalmazás szintjéig fejlesszük és ipari bevezetését elősegítsük.





Labor-részlet: Optikai-Elektronikai Főosztály

A látási érzetek objektív mérése

Schanda János
a műszaki tudomány doktora

Bevezetés

Az emberiség ősi vágya, hogy a természet jelenségeit megmérje. Nem kivételek ez alól azon jelenségek sem, melyek közvetlenül kapcsolatban állnak az emberi érzékekkel, mint pl. a hallás vagy a látás. Ezek között is kitüntetett helyet foglal el a látás, s a látásérzetet kiváltó inger, a fény. Talán azért is, mert a környezetből érkező információk tulnyomó többségét az ember szeme közvetítésével érzékeli. A fizikai mérések területén ez abban nyilvánul meg, hogy a fénymérés alapegységét felvették az SI egységek rendszerébe.

A fénymérés törvényes rendszere két vizuális megfigyelésen nyugszik:

- A nappali látás tartományában a világosság érzet az azt kiváltó inger (stimulus) erősségével arányos. Azaz, ha két fényingert azonos világosságúnak érzékelünk, úgy a két inger szuperpozíciójával létrehozott inger által kiváltott hatás azonos világosság érzetet hoz majd létre, mint az egyik inger kétszeres mennyisége.
- A különböző színű (hullámhosszúságu) fényingerek által kiváltott világosság érzetek eltérnek egymástól.

A fenti két megfigyelést kiegészíti, hogy felváltva a szembe juttatva két különböző színű fényingert és azok váltási frekvenciáját növelve, előbb szűnik meg a szinkronizáltságból származó lüktetés érzet, s csak magasabb frekvenciákon az intenzitáskülönbségből származó. Így olyan köztes frek-

venciát beállítva, melynél színlűktetés már nem lép fel, de intenzitáslűktetés még igen, a két inger erősségét szabályozva lűktetés (flicker) minimumot lehet beállítani. Az ilyen körűlmények között észlelt intenzitásokat nevezték azonos erősségűeknek. Nemzetközileg 1924-ben fogadták el a fotometria alapjaként az így meghatározott szem érzékenységi görbét, az $un. V(\lambda)$ görbét.

A klasszikus fotometria határai, továbbfejlesztésének lehetőségei

A fentiekben vázolt $V(\lambda)$ görbével és a lineáris addíció kísérleti tényének felhasználásával a fotometria és a radiometria kapcsolatát az alábbi egyenletben foglalhatjuk össze:

$$\phi = K_m \int_{360 \text{ nm}}^{830 \text{ nm}} S_\lambda V(\lambda) d\lambda \quad \dots 1$$

ahol a 360 nm és a 830 nm a $V(\lambda)$ görbe értelmezési tartományának határai. S_λ a szembe jutó sugárzott teljesítmény spektrális eloszlása, K_m arányossági tényező, mely a radiometriai mennyiséget a fotometriai mennyiséggel (ϕ) kapcsolja össze.

Évtizedeken át eredményesen használták a fotometria ezen rendszerét. Az elmúlt években azonban több olyan fénymérési feladat lépett fel, melynél a vizuálisan észlelt világosság és a műszeresen meghatározott fénysűrűség között eltérés mutatkozott. Ilyen eltéréseket tapasztaltak színes képmegjelenítők (display-k, képcsövek stb.) fotometriájánál, de több modern fényforrás vizsgálatánál is. Így pl. a legmodernebb, három keskenysávú fényport tartalmazó fénycső fényárama és világossága közt mutatkozott arányeltolódás az azonos színű hagyományos fénycsővön észleltekhöz képest.

Az eltérések egy részét vissza lehetett vezetni a $V(\lambda)$ görbe meghatározásának hibájára, de azt is megállapították, hogy a klasszikus fotometria keretei között nem lehet olyan korrekciókat kidolgozni, hogy a vizuális észleletek az objektív mérésekkel összhangba kerüljenek. Az eltérések okát abban kell keresnünk, hogy a fotometriát a radiometriával összekapcsoló

egyenlet ezen világitási körülmények között már nem érvényes.

Egyrészt a flicker-fotometria látási körülményei lényegesen eltérnek a hétköznapi gyakorlatétól, amikor az egyes tárgyakat egymás mellett látjuk. Másrészt a látásérzet a fénysugár akromatikus összetevőjén kívül annak színességétől is függ.

A nappali látás intenzitástartományában a külvilágról kapott információt háromféle csap-pigments közvetítésével nyerjük, melyek a látható szinkép rövid-, közép-, illetve hosszuhullámu tartományában érzékenyek. Az ezek által létrehozott ingerületek különböző sejtek közvetítésével három másfajta ingerületté alakulnak, melyek közül az egyik a sugárzás klasszikus fény-intenzitásával arányos, a másik kettő pedig arra vonatkozó információt közvetít, hogy a fény mennyire vörös vagy zöld, illetve sárga vagy kék. Az agy által feldolgozott világosság információ ezen elképzelés szerint az akromatikus és a két színjel vektori eredőjeként keletkezik:

$$L_{xx} = (A^2 + T^2 + D^2)^{1/2} \quad \dots 2$$

ahol

$$\begin{aligned} A &= 0,000 X + 0,954 Y + 0,010 Z \\ T &= 0,799 X - 0,649 Y - 0,167 Z \\ D &= 0,000 X - 0,058 Y + 0,030 Z \end{aligned} \quad \dots 3$$

Ezek szerint a korrigált kvantitativ világosság jelet a fotometriai (Y) jelen kívül a színmérés X és Z adatának felhasználásával kapjuk. Intézetünkben vizsgáltuk, hogy ezen korrigált fotometria mennyiben alkalmas a látásérzettel jobban korreláló ún. magasabbrendű fotometria megvalósítására. Kísérleteinkkel kimutattuk, hogy színes képmegjelenítők fotometriájában a színi információ felhasználás az érzetnek sokkal jobban megfelelő leírás-módot tesz lehetővé.

Ennek alapján az Intézetben megkezdjük új típusu színmérőműszer kidolgozását, mely a szín meghatározásán kívül lehetővé teszi a magasabbrendű fotometria törvényszerűségei szerinti fénymérést is.

Kombinált szín és "világosságmérő"

A mérőberendezés három főegységből áll: mérőfej, központi egység és számítógépes kiértékelő rendszer.

- A mérőfej "megvilágításmérésre" alkalmas bemenő optikával rendelkezik. A fényt a "cosinus" törvény szerint érzéklő bemenő fokozat mögött szál-optikás fényosztót helyeztünk el, mely gondoskodik arról, hogy a fény a mérőfej kivilágításának egyenetlenségeitől függetlenül minden fényelemet azonos arányban érjen. A fényelemek előtt helyezkednek el az igen gondosan elkészített színmérő illesztő szűrők, melyek biztosítják, hogy a rendszer szabványos színmérőszámokat nyújtson. A mérőfejben helyeztük el az előerősítőket is.
- A mérőfejből szabványos, a színmérőszámokkal arányos jelek jutnak a központi egységbe, mely a további erősítőknél kívül tartalmazza a tápegységeket, a működéshez szükséges időzítő áramköröket stb. is.
- A számító rendszer mikroszámítógépes adatfeldolgozó és kijelző berendezés, mely szabadon programozható valamely magasabb szintű számítógépes nyelven.

A szabad programozhatóság lehetővé teszi, hogy a 2. és 3. képlet egyenleteit a programban rögzítsük, s így a készülék képernyőjén a magasabbrendű fotometriának megfelelő jellemzőket olvassuk le.

Az adaptáció figyelembevétele

Az emberi szem látásmechanizmusát nemcsak a figyelt jel fénysűrűsége és színe befolyásolja, de hat rá a figyelt jel környezetének fénysűrűsége is. A világosság kvantitatív leírásának ezen szempontját is figyelembe veszi a következő képlet:

$$Q_{\text{sz}} = a(kL^{1/3}) - b \quad \dots 4$$

ahol L a fénysűrűség, a , b és k definíciója pedig a következő:

Az a tényezőt az összehasonlító fehér felület fénysűrűsége (L_n), a jel helyén levő fehér felület fénysűrűsége (L_f), a környezet átlagos fénysűrűsége (L_s), valamint a jeltartománynak (pl. a képernyőnek) a jelhez viszonyított felülete (α_f) és a környezetnek a jelhez viszonyított felülete (α_s) határozza meg:

ahol

$$a = q_a (L_n^{-0,164}) \quad \dots 5$$

$$q_a = 35,2(I)^{-0,13} \quad \dots 6$$

és

$$I = \frac{\alpha_f L_f + \alpha_s L_s}{\alpha_f L_f} \quad \dots 7$$

Ezen kifejezésben I értéke arra jellemző, hogy milyen mértékű a jel világossága az adott környezetben ahhoz képest, hogy mekkora lenne sötét környezetben (indukciós hatás).

A b értéke a világosság - fénysűrűség függvény alakját módosítja a környezet fénysűrűségének és méretének függvényében:

$$b = q_b (L_n^{0,215}) \quad \dots 8$$

ahol

$$q_b = 0,389 (I)^{0,362}$$

k értékét a jel színe szabja meg:

$$k = \text{antilog} (mp_e^n) \quad \dots 9$$

ahol p_e a jel gerjesztési tisztasága, m és n értékét pedig az alábbi egyenletek adják:

$$\begin{aligned} m &= 0,2983 (\log 10P) - 0,1834 \\ n &= 1,3268 (\log 10P) - 0,0304 \end{aligned} \quad \dots 10$$

és

$$P = \frac{(C_1^2 + C_2^2)^{1/2}}{A}$$

ahol

$$C_1 = 1,66 R - 2,23 G + 0,37 B$$

$$C_2 = 0,34 R + 0,06 G - 0,71 B$$

$$A = 0,85 R + 0,15 G$$

...11

ahol

$$R = 0,0713 (X/Y) + 0,963 (Y/Y) - 0,0185 (Z/Y)$$

$$G = -0,395 (X/Y) + 1,16 (Y/Y) - 0,0185 (Z/Y)$$

$$B = 0,561 (Z/Y)$$

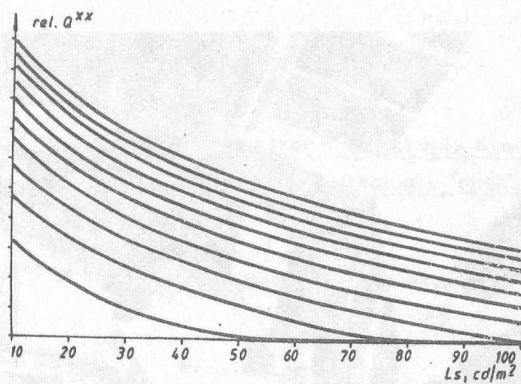
...12

Kísérleteket végeztünk ezen képletekkel számítható kvantitatív világosság meghatározására, a környezet fénysűrűségének a jel láthatóságára gyakorolt hatásának megfogalmazására és a számítási eredményeknek a vizuális kísérletekkel való összhangjának megállapítására.

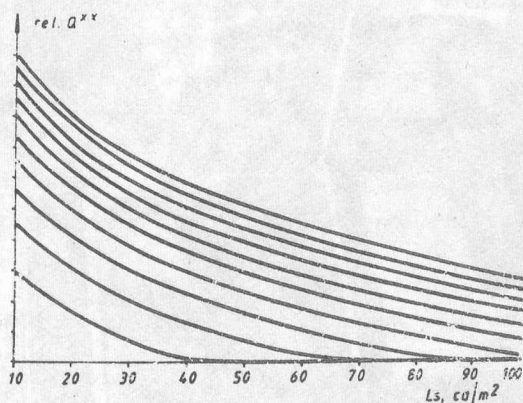
Az 1. ábrán színes monitor képcső alapszíneinek relatív világosságát látjuk a környezet fénysűrűségének függvényében. Látható, hogy a relatív világosság a környezet fénysűrűségének növelésével minden esetben csökken, de ez a csökkenés a zöld alapszín esetében sokkal rohamosabb, mint a vörös vagy a kék szín esetén: A vörös és kék sokkal ellenállóbb a környezet fénysűrűségével szemben, mint a zöld. Ezt a függést a szinkör többi színére is megvizsgáltuk, s a kísérleti megfigyelésekkel jó összhangban azt találtuk, hogy erősen változó környezeti fénysűrűségi helyeken nem célszerű világossárga vagy zöld színeket használni, viszont előnyösek a narancssárga vagy vörös színek.

Összefoglalás

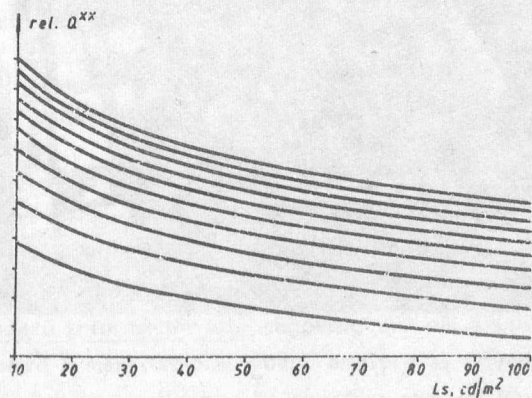
A fotometria klasszikus és a fizikusok által az elmúlt évtizedekben igencsak elhanyagolt területén számos fiziológiai és pszichológiai felismerés született, melyeket napjainkban kell a fizika nyelvére lefordítani. Ezen vizsgálatokat elvégezve olyan új fotometriai rendszerhez jutunk, mely az emberi érzeteknek jobban megfelel, melynek alapján olyan műszereket lehet kidolgozni, melyek pontosabb, a gyakorlat igényének jobban megfelelő eredményeket nyújtanak.



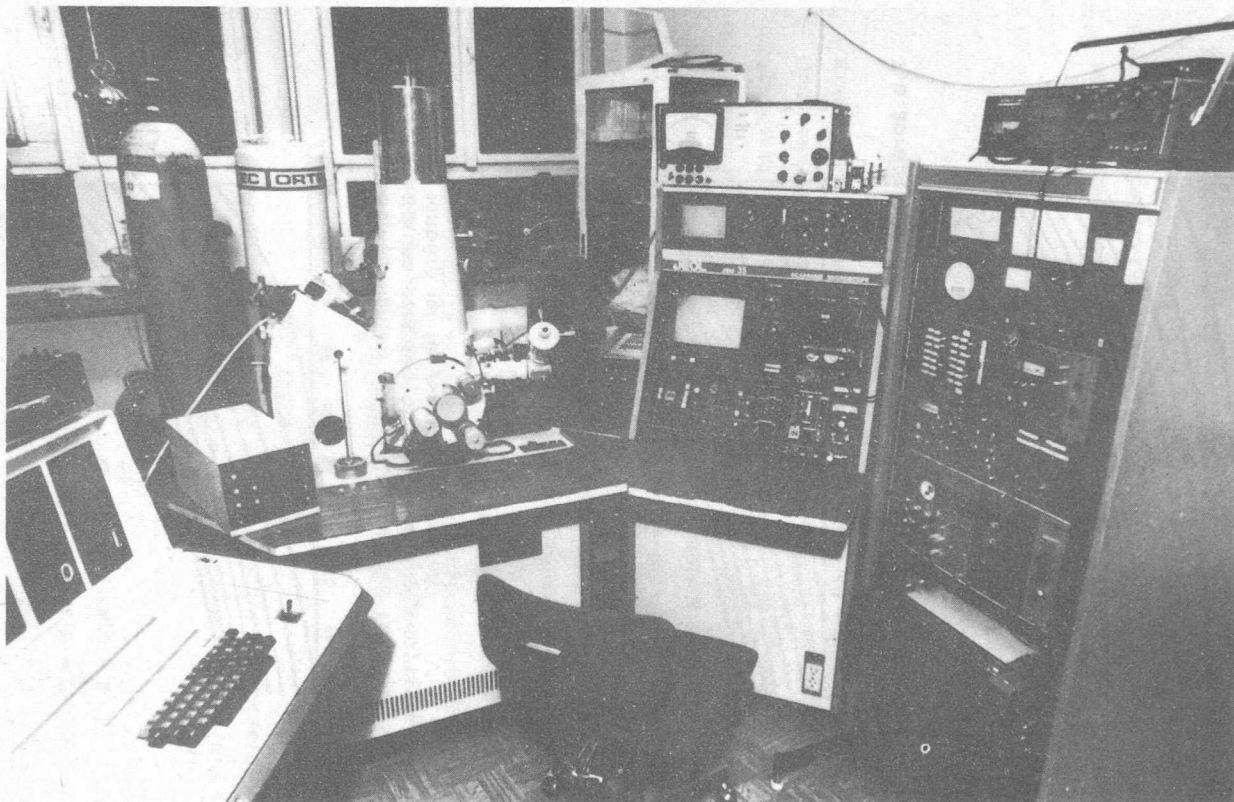
1.a.ábra: Színes monitor vörös alapszinének rel.világossága a környezet fénysűrűségének függvényében, különböző jel fénysűrűségek esetén



1.b.ábra: Mint 1.a. , de a zöld alapszinre vonatkozóan



1.c. ábra: Mint 1.a., de a kék alapszinre vonatkozóan



Elektronmikroszkópos analizátor berendezés

A transzmissziós elektronmikroszkópia szerepe
az anyagkutatásban és a technológia fejlesztésben

Zsoldos Lehel
a fizikai tudomány kandidátusa

Az elektronmikroszkópia ma már több mint 50 éves és az utóbbi években számtalan, más korszakalkotónak minősíthető felfedezés történt; így joggal kérdezhetjük: nem valamilyen fantáziátlansággal kevert konzervativizmus bujik-e meg amögött, hogy a "jövő utjait" vizsgálva éppen erre tesszük a hangsúlyt? A transzmissziós elektronmikroszkópia (TEM) utóbbi években tapasztalt, változatlanul megállíthatatlannak tűnő fejlődését látva, nyugodtan mondhatjuk, hogy nem erről van szó; éppen ellenkezőleg észre kell vennünk a benne rejlő lehetőségeket, ezért érdemes erre – akár ismételten is – néhány szót "parazolnunk".

Az alábbiakban két kérdéscsoportot szeretnék röviden tárgyalni:

- Mire jó a TEM? Mit kell szem előtt tartanunk egy TEM vizsgálat elvégzésénél ill. értékelésénél?
- Mit kellene tennünk az ésszerű fejlesztés érdekében?

Milyen információkat ad a TEM? Az elhajlási kép szerepe

Ma már köztudott, hogy az anyagok viselkedését azok szubmikroszkópikus, de atomi méreteknél nagyobb részeinek lokális szerkezete szabja meg. E szerkezet egyes jellemzőinek mérésére sok kitűnő – többnyire közvetett – eljárást ismerünk, amelyek közül egy a TEM, de egyetlen szempontból egyedülálló: képszerű információt ad, mégpedig 0,2 nm körüli felbontásban, tehát éppen abban a mérettartományban, amelyre az anyagkutatásban leginkább szükségünk van; alkalmas az egyetlen atomnál jóval nagyobb szerke-

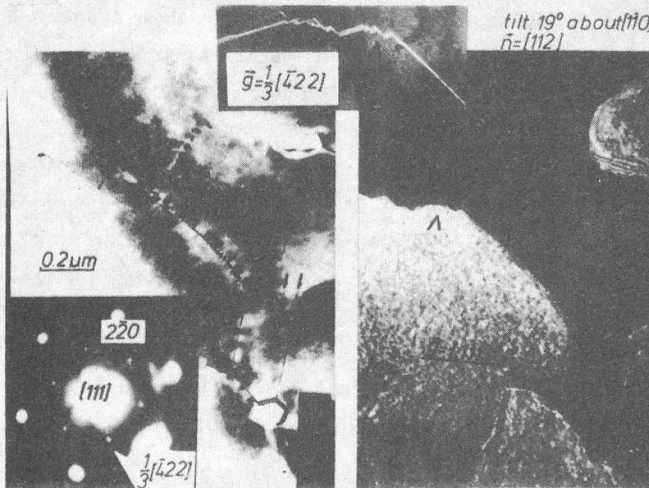
zeti vagy kémiai inhomogenitások szerkezetének felderítésére. (Egyedülálló szennyező atom megfigyelésére is van mód, azonban pl. egy hig szilárd oldat tanulmányozására sok más lehetőség adódik.)

A "kép" szerepét természetesen nem szabad tulbecsülni. (Ezzel nem egyszer találkozunk.) A mindennapi életben is, a vizuális információ értékeléséhez folyamatosan felhasználjuk mindazt az ismeretet, amit csecsemőkor-tól kezdve szereztünk, miközben valamennyi érzékszervünkkel folyamatosan "letapogattuk" környezetünket. A kép tehát önmagában semmit nem mond, mégis pótolhatatlan. Atom méreteiben az értelmezéshez szükséges háttér-információ azonban ma még nagyon hiányos. A különböző jelenségek leírásához ragyogó hipotéziseket ill. modelleket alkothatunk, a tapasztalat mégis azt mutatja, hogy a természet e téren is tulszárnyalja fantáziánkat. Ezért, ha erre mód van az anyagot "meg kell nézni". Éppen a fentiek miatt azonban ez nem elég; egyidejűleg más információkra is szükségünk van, a mintavétel ill. készítés körülményeinek és az egyéb tulajdonságok ismeretén túl elsősorban azokra, amelyek a leképezés fizikai körülményeivel függnek össze. A TEM rohamos térnyerése éppen azzal függ össze, hogy többet nyújt mint egy egyszerű sötét-világos képet. Háttér információként mindig ott áll a vizsgált anyagon keletkezett elhajlási kép, amelyet sokoldaluan ki lehet és ki is kell használni az értelmezéshez. (Ennek természetesen már műszaki feltételei is vannak, és már most meg kell mondanunk, hogy ilyen szempontból a hazai eszközpark kifogásolható.)

Mindezt legegyszerűbb néhány példán bemutatni.

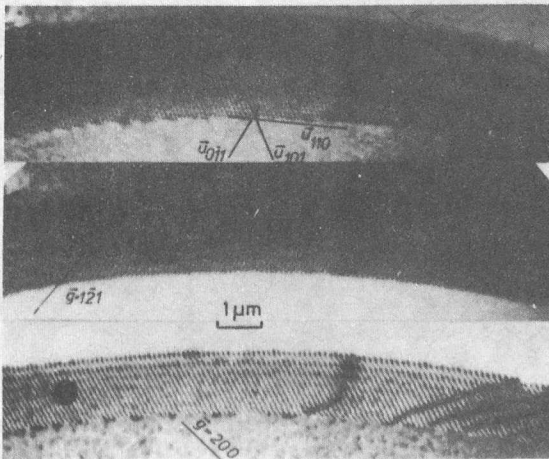
Az 1. ábra egy szemcsehatárt mutat be különböző leképezési feltételek mellett [1]. A baloldali un. világos látóterű képen (amelynél a leképezésből a központi, 0-ad rendű nyaláb és szűk környezete kivételével minden elhajlási rendet kizárunk) csak a szemcsehatár jelenlétét látjuk, de furcsa módon az elhajlási kép egységes orientációt mutat, legfeljebb a gyenge, az Al lapcentrált rácsa miatt tiltottnak minősülő reflexiók megjelenése lehet gyanús. Ha azonban a mintát kissé megdöntjük, rögtön kiderül, hogy nincs szó egységes orientációról (csupán egy vetületben látszott olyannak) és az 111 reflexióval készített sötét látóterű képen (most az 111 elhajlási rend megy csak végig az optikai rendszeren) már csak az egyik szemcse látszik, a másik ehhez nem adott járulékot. A jelölt tiltott reflexióval készült sötét látó-

terü képen pedig csak a szemcsehatár látszik (középen fent), azaz a tiltott reflexió innen származik, ahol a rendszerben az Al rács szimmetriája nem érvényesül, de a translációs szimmetria többé-kevésbé megmarad. A két vizsgált szemcse íkerkristály.



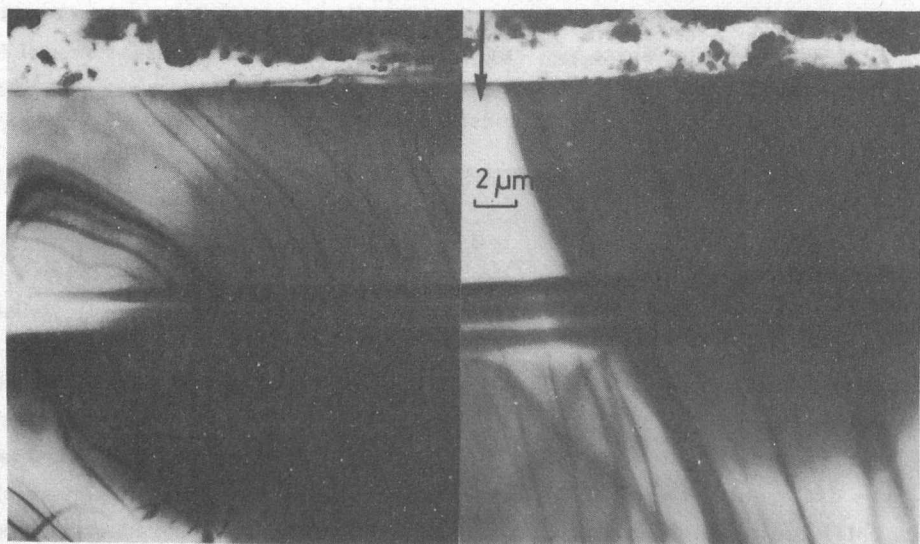
1. ábra: Szemcsehatár vákuumpárolgatással előállított Al vékonyrétegben (Radnóczy Gy.)

Második példánk (2. ábra), ugyancsak szemcsehatárt mutat be, de W-ban.

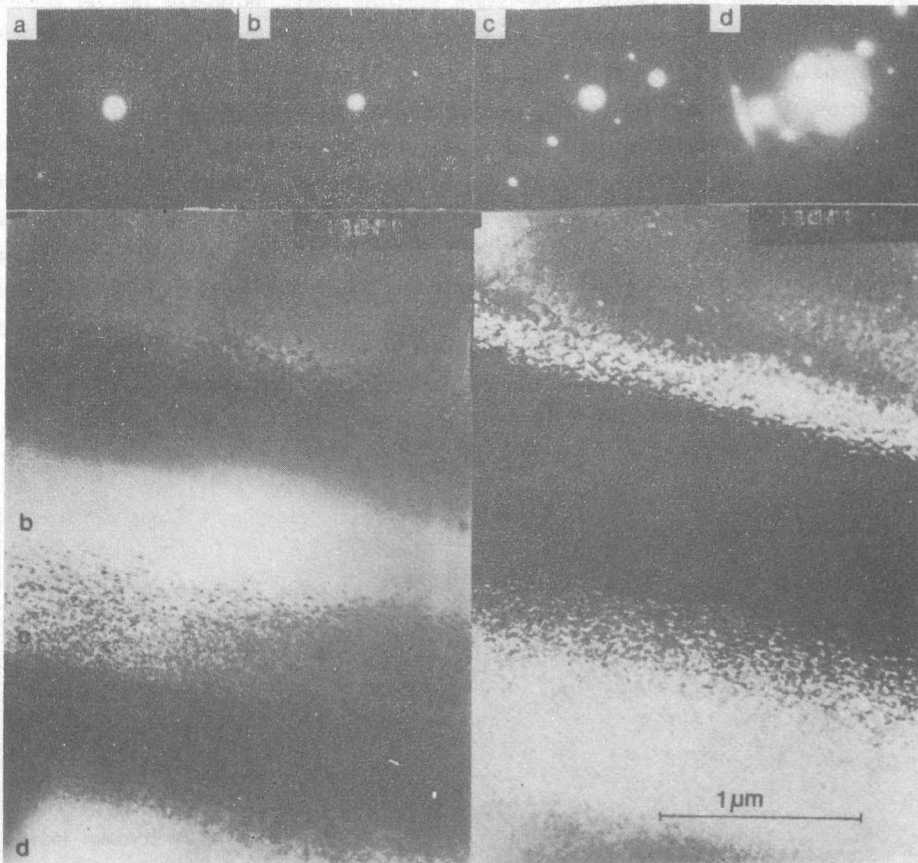


2. ábra: Szemcsehatár diszlokációk volfrámban (Radnóczy Gy.)

A határon un. szemcsehatár diszlokációk hálózata alakult ki. (Ez nem azonos a kisszögű szemcsehatárokat alkotó közismert diszlokáció hálózattal!) Figyeljük meg, hogy változik a szemcsehatár diszlokációk kontranzsztja attól függően, hogy a minta döntésével melyik elhajlási rend válik uralkodóvá a leképezésben. A kontraszt változásának kvalitatív megfigyelése önmagában elég lehet kvalitatív megállapításokhoz. Általában azonban a kvantitatív kiértékelés a feltételezett szerkezet alapján végzett számítógépes kontraszt szimuláción alapszik [2]. Az előbbi két esetben az elhajlási kép (a leképezésben szerepet játszó szórt hullámok) ismeretére a kontraszt keletkezésének és jellegének megértéséhez volt szükségünk. Számos esetben azonban az elhajlási képet közvetlenül is felhasználjuk egy-egy kiválasztott, 10-1000 nm átmérőjű térfogat elemében elfőrdülő szilárd fázis(ok) meghatározására. Jó példa erre a 4 MeV He^+ ionokkal bombázott Si vizsgálata. A 3. ábra a bombázott réteg teljes keresztmetszetét mutatja mérséklet nagytásban, a 4. ábra pedig körülbelül azt a részletet, ahol az ionok teljes lefékeződése megtörténik, világos (balra) és sötét látóterű (jobbra) képként, néhány kiválasztott terület elhajlási képével együtt (felső csikban).



3. ábra: 4 MeV He^+ ionokkal bombázott Si keresztmetszeti képe. A sötétebb csikok un. extinkciós vonalak. Nem a rács-hibáktól, hanem a minta görbületétől erednek. (Barna Á.)



4. ábra: Az előző ábrán bemutatott minta nagyobb nagyításban, világos és sötét látóterű képen. A felső szélén elhelyezett elhajlási képek a megfelelő betűvel jelzett területről készültek (Barna Á.)

A legfeltűnőbb az, hogy két látszólag erősen roncsolt réteget látunk, közöttük egy majdnem homogén, de azért két-részesnek tekinthető sávval, amelyben apró buborékok is vannak. A különböző helyekről készült elhajlási képek azonban azt mutatják, hogy éppen ez a belső sáv van legerősebben roncsolva. Felső része teljesen amorf (a), lejjebb (ahol több a

buborék) halvány nyoma maradt a kristályos szerkezetnek (b), az erősen roncsoltnak tűnő rész pedig egykristály (c), ha rossz minőségű is. (A sötét látóterű képen erőteljesebben megjelenő "szemcsés" kontraszt az egymáshoz képest kissé elorientált blokkoktól ered: egy-egy reflexióhoz csak egy részük ad nagyobb járulékot). A hibátlan (és vastag) Si-ra jellemző kép (d) csak jóval mélyebben jelenik meg.

Az elhajlási képek segítségével tehát egyértelműen megmondhatjuk, hogy a különböző rétegekben az anyag milyen állapotba került. Hasonlóképpen azonosíthatók kisméretű kiválások, stb. Erről még később szót ejtünk.

A TEM tehát leegyszerűbb formájában is többet nyújt az egyszerű képnél: az elhajlási kép fontos információkat hordoz, de ennek kihasználásához alapvető követelmény pl. a minta és a megvilágító nyaláb dönthetősége.

A fejlődés irányai

A TEM várható fejlődése négy fő irány [3,4] köré csoportosítható:

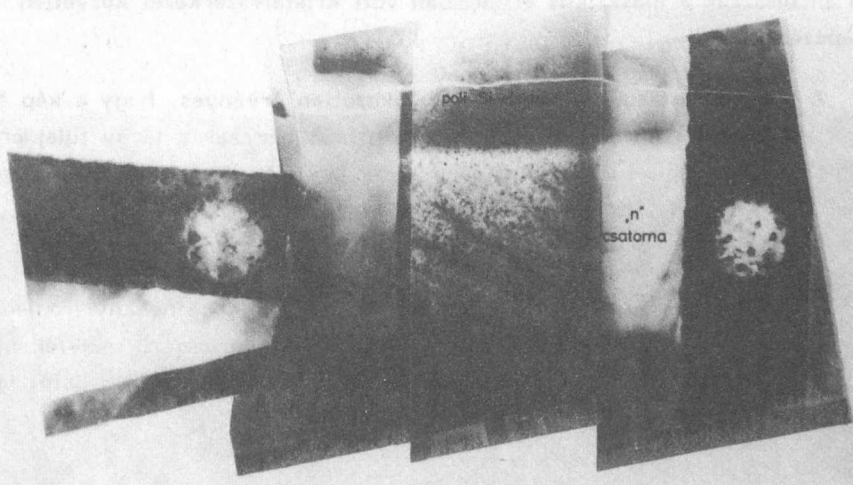
- "in situ" TEM
- nagyfeszültségű (≥ 500 keV) TEM (HVTEM)
- analitikai TEM (ATEM)
- nagyfelbontású TEM (HRTEM)

Közülük egyik sem új irányzat; az ilyen irányú törekvések nyomai már a kezdettől fogva megfigyelhetők, mára azonban világosan látszik, hogy a sokféle fejlesztési lehetőség közül a gyakorlati problémák megoldása főként a felsoroltakat igényli. Foglaljuk röviden össze a rájuk vonatkozó legfontosabb tudnivalókat.

Az "in situ" vizsgálatok célja különböző folyamatok közvetlen elektronmikroszkópos megfigyelése. E célra a mintatér a megfelelő környezet (változó hőmérséklet, ultra-nagyvákuum, vagy szabályozható atmoszféra, stb.) előállítására alkalmas munka-kamrává van alakítva, amely lehetővé teszi egyrészt a minta néhány fontos fizikai tulajdonságának mérését, másrészt a szükséges beavatkozásokat (pl. deformálás, rétegnövesztés). Nyilvánvaló, hogy az ilyen rendszerek megvalósítása elsősorban a kitűzött feladattól

függ; a mikroszkóp gyártó cégek ilyen jellegű fejlesztéssel nem foglalkoznak. Az MFKI-ban az "in situ" mikroszkópiának régi hagyományai vannak. Néhány eredményéről Barna P. számol be ugyanebben a kötetben [5].

A nagyfeszültségű elektronmikroszkópia főként a nagyobb átvilágítható minta vastagság miatt érdekes és ez ma elsősorban az alkalmazott kutatás számára fontos, hiszen pl. egy többrétegű félvezető szerkezet már nem világhítható át a 100 keV körüli gyorsító feszültséggel. 1 MeV körüli gyorsító feszültség azonban akár egy működésre képes (de a hordozó oldalról elvékonyított) tranzisztor átvilágítására is alkalmas (5. ábra), sőt a pásztázó elv alkalmazásával (l. analitikai elektronmikroszkóp) a működő tranzisztor is vizsgálható.



5. ábra: Tranzisztor, 1 MeV gyorsító feszültséggel átvilágítva.
(A felvétel az NDK Tud.Akadémia hallei Szilárdtest-fizikai, és Elektronmikroszkópiai Intézetében készült; Barna Á.)

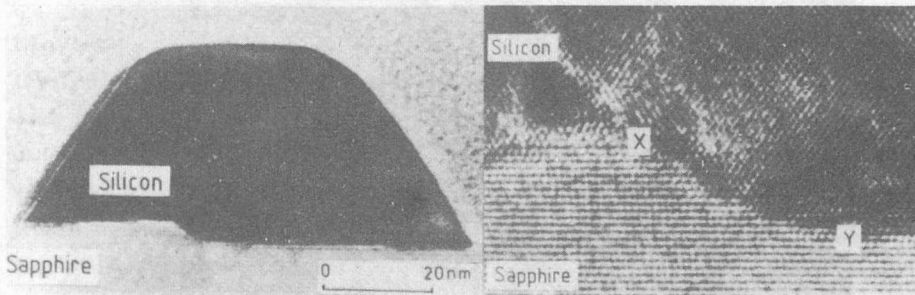
Az analitikai elektronmikroszkópia elsősorban a lokális kémiai analízis érdekében, egy a mintára néző röntgen spektrométerrel van felszerelve, de a pásztázó elv alkalmazásával (STEM - "scanning" TEM) a leképezés bármilyen egyéb jel (visszaszórt elektron, mintaáram, adott veszteségi energiájú

elektron...) felhasználásával megvalósítható. Analitikai TEM nélkül versenyképes technológia fejlesztés ma számos területen elképzelhetetlen. Ma a legkorszerűbb berendezésekkel $10^{-18} - 10^{-19}$ g anyag 10 nm, vagy kisebb átmérőjű területen, kedvező feltételek mellett kimutatható; a legtöbb esetben ennél szerényebb teljesítmény is elegendő. Az intézetben 1973 óta működő Jeol 100 U mikroszkóp, hullámhosszdiszperzív spektrométerrel felszerelve, kb. 100 nm legkisebb átmérőjű területet tud analizálni és ennek segítségével W-ban $2 \cdot 10^{-17}$ g K-ot [6] ill. Si-ban 10^{-16} g körüli oxigént ki lehetett mutatni [7].

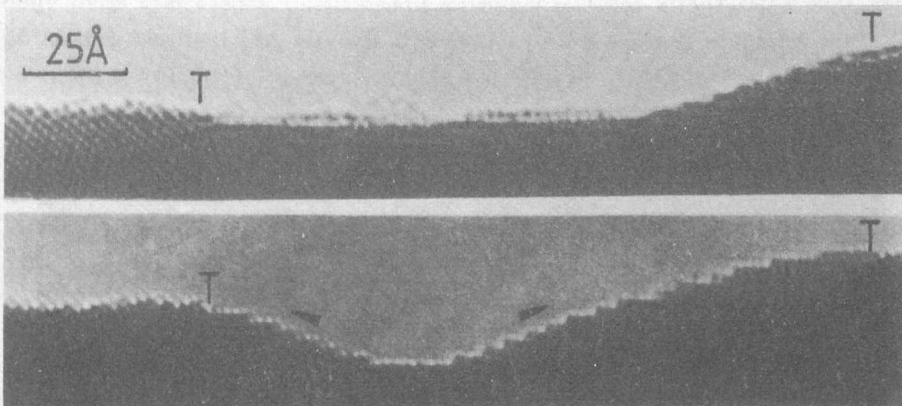
A nagyfelbontású elektronmikroszkópia már az atomi méretű szerkezeti részletek felderítését célozza. Alkalmazása számunkra elsősorban a határfelületek szerkezetének és viselkedésének megértése szempontjából fontos (katalízis, kerámiák szerkezete, félvezető technológiák, ...), de sikeresen alkalmazzák a klasszikus értelemben vett kristályszerkezet közvetlen leképezésére is.

A nagyfelbontású mikroszkópiánál fokozottan érvényes, hogy a kép önmagában nem értékelhető. A megjelenő kontraszt nemcsak a tárgy tulajdonságait tükrözi, hanem a leképező rendszerét is (defókuszálás mértéke, lencsehibák,...) és ez utóbbiak hatása nem másodrendű. A megbízható értékelést itt többnyire a kontraszt számítógépes szimulálásával kell kezdeni.

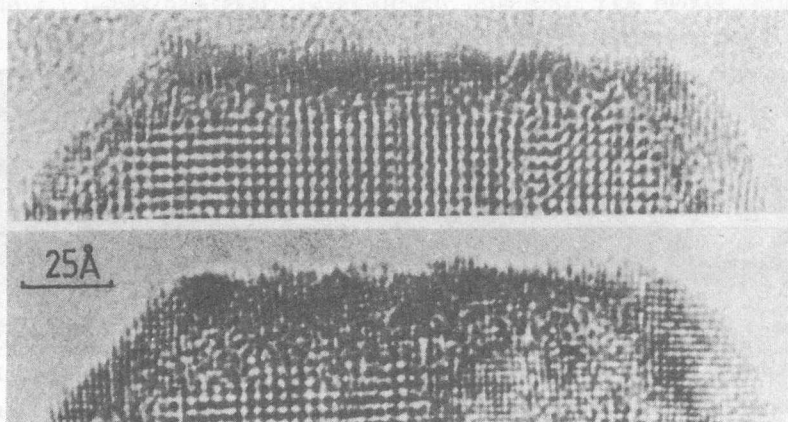
A módszer alkalmazására a 6-9. ábrákon mutatunk be néhány irodalomból vett példát. Érdekes itt még megemlíteni, hogy a korszerű nagyfelbontású berendezéseken a nyaláb akár néhány nm átmérőjűre fókuszálható, így ekkora területről kaphatunk elhajlási képet is.



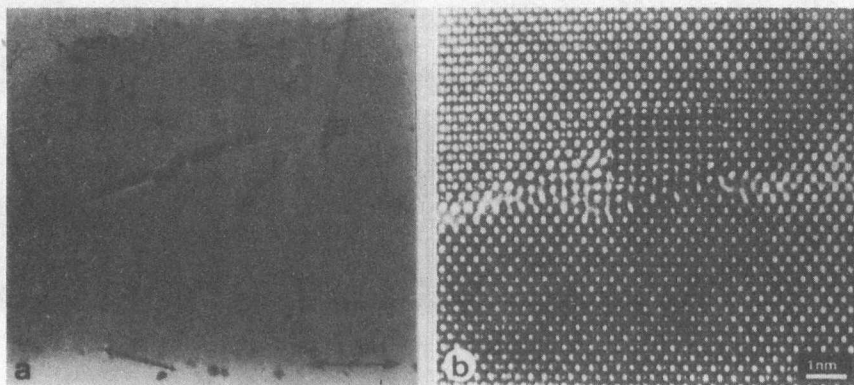
6. ábra: A hordozó erróziója 1050^oC-on növesztett SOS szerkezetben, nagyfelbontású TEM felvételen 8



7. ábra: Arany migráció az (111) felület mentén az ikerhatárok felé. A kép (100) irányú vetület és a két felvétel között 2 óra idő különbség van [9] .



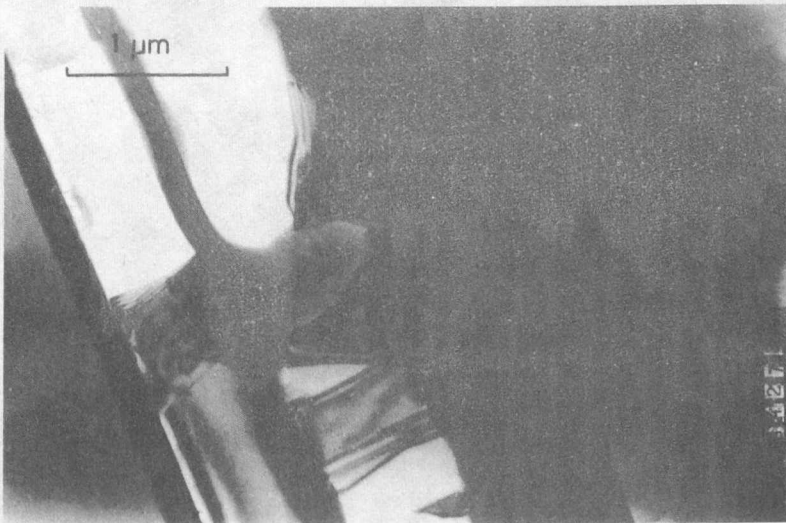
8. ábra: Oxigén deszorpció elektrongurázás hatására Nb-vel adalékolt WO_3 -ból. A két felvétel között az idő különbség 30 perc. A fémesedés előrehaladása jól megfigyelhető. [9]



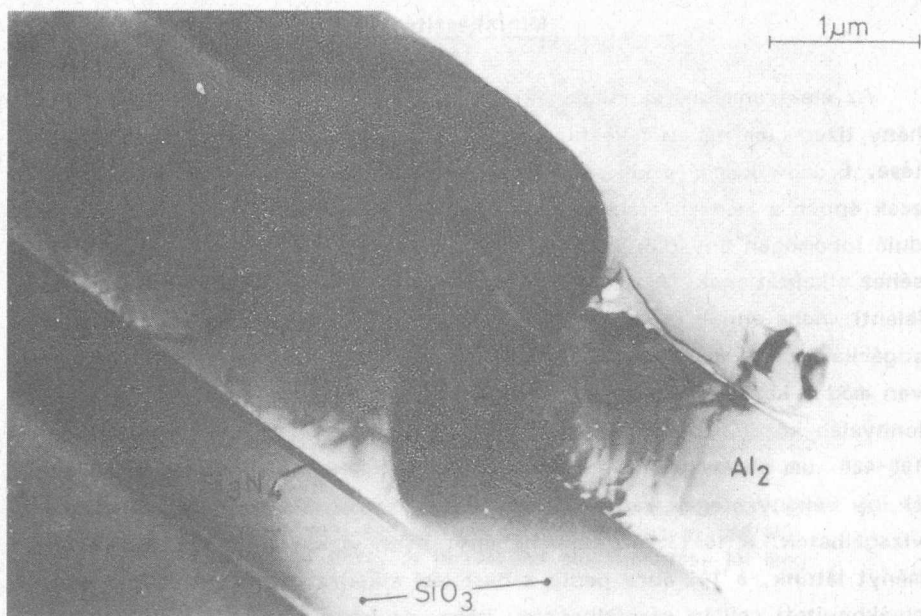
9. ábra: Kiválások N_2 -ben 700°C -on, 100 óráig hőkezelt Si-ban és egy kiválás rácscsökkentési képe. Az inzerként elhelyezett, számítógéppel szimulált kép az utóbbi közepén a SiO_2 35 kbar nyomáson szintetizálható módosulatának (coesite) felel meg. [10]

Mintakészítés

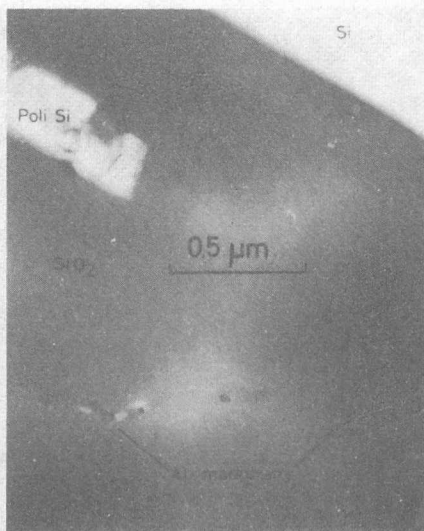
Az elektronmikroszkópiának kritikus pontja az átvilágítható (tehát néhány tízed μm -nél nem vastagabb) és műtermékektől mentes minta készítése. E célra kémiai módszereket évtizedek óta sikeresen használnak, de ezek éppen a modern technológiai problémák megoldásánál gyakran előforduló inhomogén anyagok (pl. kerámiák, félvezető szerkezetek) előkészítéséhez alkalmatlanok. A megoldást ma az ionsugaras porlasztás alkalmazása jelenti, noha ennek is több hátránya ismert. Ezek közül legfontosabbak a sugárkárosodás, a minta melegedése és a felület feldurvulása. Szerencsére van mód a káros hatások mérséklésére. Ennek első feltétele az, hogy az ionnyaláb közel surlódó beeséssel érje a minta felületét [11]. Ma már 100–400 μm átmérőjű átvilágítható területeket lehet ilyen módon előállítani, és így vékonyrétegek vagy rétegszerkezetek akár keresztmetszetben is vizsgálhatók. A 10–13. ábrákon néhány, ilyen vizsgálatból származó eredményt látunk, a 14. ábra pedig a hasadási síkjaira merőleges metszetben elvékonyított csillám rácsfelbontású képe, csupán annak illusztrálására, hogy ilyen szélsőséges tulajdonságú anyagból is lehet kifogástalan minőségű mintát készíteni. (A felvétel egy a 60-as évek végéről származó mikroszkóppal készült!)



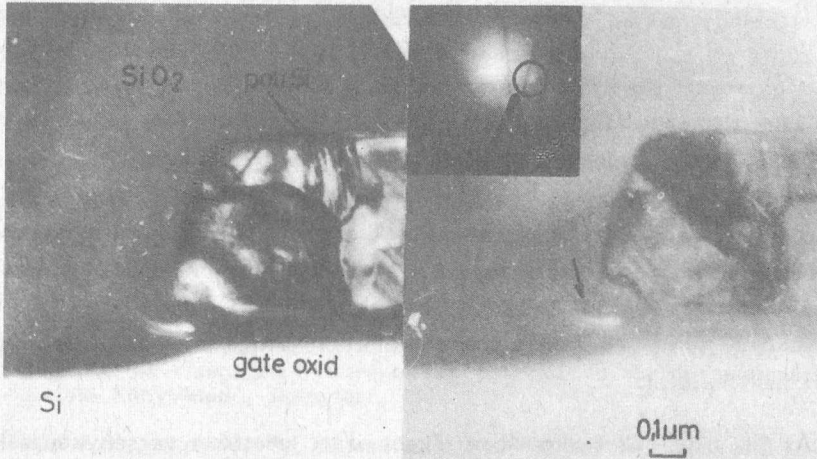
10. ábra: Poli-Si-ből kinövő "tükristály", MOS szerkezet keresztmetszetének elektronmikroszkópos képén (Barna Á.)



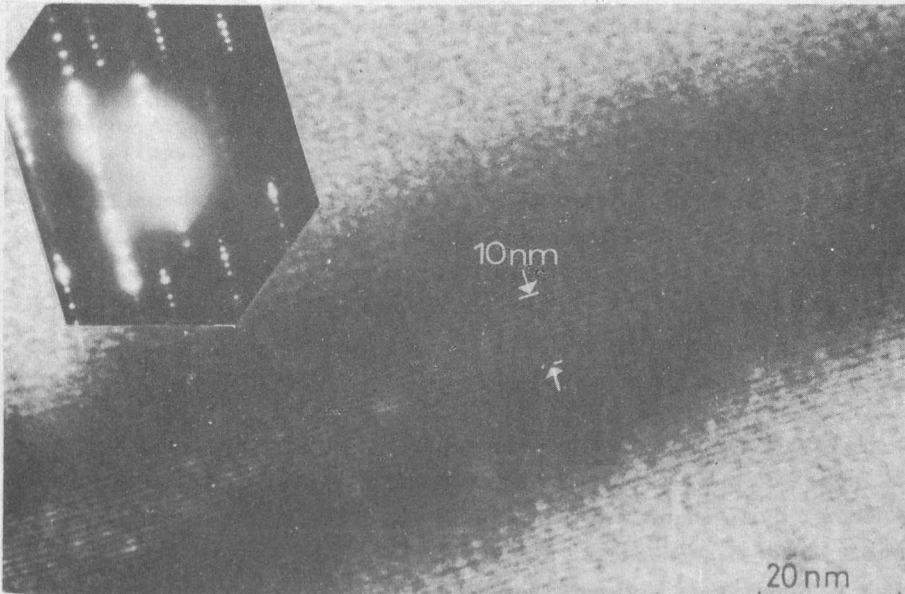
11. ábra: Repedés egy félvezető eszköz keresztveződő fémezéseit elválasztó oxidban (keresztmetszeti kép, Barna Á.)



12. ábra: Ki nem mart Al maradványok két oxidréteg között. Az Al azonosítása röntgen spektruma alapján történt. (Barna Á.)



13. ábra: Si "zárvány" a gate-oxid szélén, világos és sötét látóterű képen. Az utóbbi a Si megjelölt reflexiójával készült és így a kristályos Si egyértelműen azonosítható, hiszen a "zárvány" ezen a képen "világít". Röntgen spektroszkópiai azonosítása a környezetben levő Si miatt reménytelen, valószínű azonban, hogy egy nagyfelbontású vizsgálat további fontos információkat adhat (Barna Á.)



14. ábra: Csillám rácsfelbontású képe, hasadási síkjára merőleges metszetben, elhajlási képével együtt. A lassan változó sötét-világos kontraszt a minta enyhe görbületétől ered. (Barna Á.)

Terveink

Magyarországon számos intézmény fel van szerelve elektronmikroszkóppal, ezek többsége azonban korszerűtlen és nincs megfelelő tartozékokkal ellátva. Különösen súlyos a helyzet (és ez nem túlzás) a nem biológiai anyagkutatással foglalkozó laboratóriumokban. E területen gyakorlatilag egyetlen korszerű elektronmikroszkópunk sincs, nagyszabású beruházások indítására pedig nem lehet számítani. Ilyen helyzetben különösen fontos a helyes fejlesztés kijelölése. Lényegében az a kérdés, hogy a vázolt négy irány közül - amelyek egyike sem nélkülözhető valójában - melyikre milyen súlyt kell fektetni.

Az "in situ" mikroszkópiában főként azért lehattunk versenyképesek, mert nincsenek kommerciális berendezések. Ha most figyelembe vesszük még a vékonyrétegek alkalmazásának gyors terjedését, e módszerről lemondani nem szabad. Reálisan mégis a már meglevő lemaradás további növekedésének lassítását, esetleg megállítását tűzhetjük ki célul.

Nagyfeszültségű mikroszkópiára ma még csekély az igény, ezért e téren a nemzetközi együttműködésre kell hagyatkoznunk. Ehhez azonban az is kell, hogy más területen legalább minimális "ellentételt" is fel tudjunk ajánlati. Ugy érezzük, e pillanatban még képesek vagyunk erre, részben az ionsugaras porlasztásban elért eredmények révén.

Az analitikai elektronmikroszkópia már nagyon széles körben elterjedt, és a mai szóhasználattal "csucs-technológiát" alkalmazó nagyvállalatok laboratóriumainak is alapvető eszköze. Furcsa módon a hazai igény mérsékelte. Ezért nem annyira a már meglevő lehetőségek bővítését, mint inkább ezek fejlesztését szorgalmazzuk. A közeljövőben elsősorban az analízis laterális felbontásának javítására törekszünk.

A nagyfelbontású elektronmikroszkópia ma teljesen hiányzik a palettáról, noha a meglevő szerény eszközök felhasználásával több intézményben is folynak ilyen jellegű munkák. Ugy véljük, hogy most a legfontosabb feladat ennek meghonosítása. Ez nemcsak beruházást jelent, hanem egy újszerű "tudományos kultúra" aprólékos, szívos munkával való megteremtését is. Megfelelő, külön e célra felkészített mikroszkóp nélkül azonban

ez reménytelen vállalkozás, de lényegében ugyanez a helyzet, bármely irányu fejlesztésnél. Ezért most le kell mondanunk arról, hogy a különböző kutatóhelyek egymástól némileg is független fejlesztési programot hajtsanak végre. Az egyetlen elfogadható megoldás az, ha az érdekelt intézmények közös, hosszú távu elképzeléseket is figyelembe vevő programot dolgoznak ki. Az OTKA pályázatok rendszere erre alkalmas keretet biztosít és bízunk benne, hogy képesek leszünk ezt jól kihasználni.

Irodalom

1. Brümmer, O., Heydenreich, J., Krebs, K., Schneider, H. (szerk.) Szilárdtestek vizsgálata elektronokkal, ionokkal és röntgensugárázással. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1984.
2. Head A.K., Humble, P., Clarebrough, L.M., Morton, A.J. and Forewood, C.T. Computed Electron Micrographs and Defect Identification North-Holland Publ.Co., Amsterdam, 1973.
3. Barna P. és Malicskó L. Magyar Tudomány, 25 57, (1980)
4. Hirsch, P.B. J. Electron Microsc. 35 Suppl. 1013 (1986)
5. Barna P. MFKI Jubileumi Kiadvány (1986)
6. Barna Á., Stark, J. Met. Trans. 9A 595 (1978)
7. Pasemann, M., Barna Á., Werner, P., Hagel I. Kristall u. Technik 14 553 (1979)
8. Pans, K.C. et al.: in Microscopy of Semiconducting Materials 1985. The Institut of Physics Conf. Series 76, p. 40.
9. Smith, D.J. J. Electron Microsc. 35, Suppl. 929 (1986)
10. J. van Landuyt et al. J. Electron Microsc. 35 Suppl. 1059 (1986)
11. Barna Á. Proc. 8th European Conf. on Electron Microsc., Budapest 13-18 Aug. 1984. p. 107.

Új anyagok és strukturák a mikrohullámu

félvezető eszközökben

Mojzes Imre

a műszaki tudomány kandidátusa

1. Bevezetés

A szilícium és germánium alapu félvezető eszközök technikája és technológiája meghatározóvá vált egy-egy ország fejlettségi szintjének megítélésében. Ezek az alkatrészek munkánk, hétköznapijaink és szórakozásunk szempontjából meghatározók lettek, lassan szinte minden tárgyunk részévé váltak. E fő vonal mellett egyre különlegesebb anyagok is mind többet szereznek. Ezek az anyagok a vegyületfélvezetők, amelyet - érdekes tény - az emberiség még az elemi félvezetők előtt megismert és használt, elsősorban a detektoros rádiók alkatrészeként, amit híradástechnikai alkalmazásnak tekinthetünk. Az elektroncsövek hegemoniája azonban egy időre háttérbe szorította ezeket az anyagokat, intenzívebb kutatásuk csak a XX. század 50-es éveiben indult meg. E területen igen jelentős esemény volt a gallium és arzén vegyületének szintézise, amely egy, a természetben nem előforduló anyagot, a gallium-arzenidet (GaAs) eredményezte. Hamarosan kiderült, hogy ez az anyag - elsősorban sávszerkezete miatt - igen előnyös fizikai tulajdonságokkal rendelkezik. Ezek a tulajdonságok tették lehetővé, hogy mind a nagyfrekvenciás, mind az optoelektronikai alkatrészek anyagaként meghatározó szerepet játszhatnak.

2. Vegyületfélvezetők

A terjedelem korlátai miatt itt csak táblázatosan adjuk meg a tárgyunk szempontjából legfontosabb két vegyületfélvezető, a GaAs és az indiumfoszfid (InP) főbb jellemzőit (ld. 2.1. táblázat). Külön bemutatjuk a GaAs azon tulajdonságait, amelyek a mikrohullámu monolit integrált áramkörök

2.1. táblázat

Különféle félvezető anyagok összehasonlítása néhány főbb szempont szerint

Anyagparaméter	Mérték egység	Ge	Si	GaAs	GaP	InP
Dielektromos állandó	-	-	11,80	12,53	-	12,37
Tiltott sáv szélessége /300 K/	eV	0,67	1,12	1,43	2,24	1,26
Tiltott sáv szélessége /4 K/	eV	0,76	1,14	1,52	2,33	1,42
Elektronmozgékonyosság	cm ² /Vsec	3900	1350	8500	110	4600
Lyukmozgékonyosság		1900	475	500	75	156
Max. drift-sebesség	10 ⁷ cm/sec	-	0,6	2,1	-	2,8
Kritikus térerő	kV/cm	X	X	3,6	X	12,4
Hővezetés	W/cm	-	0,84	0,54	-	0,70

Megjegyzés: A kritikus térerő sorában lévő X jel a Gunn-jelenség hiányát mutatja

(MMIC) szempontjából fontosak (2.2. táblázat). A 2.3. táblázat pedig az eszközök készítése szempontjából fontos jellemzőket mutatja be. Végezetül az egyik legfontosabb mikrohullámu aktiv elem a MESFET tranzisztor jellemzőit hasonlítjuk össze szilíciumra és gallium-arszenidre (2.4. táblázat), illetve néhány tulajdonság viszonylatában GaAs-re és InP-ra. Jól látható ebből, hogy mikrohullámu eszközök szempontjából a GaAs előnyösebb tulajdonságokat ígér, mint a szilícium, az InP pedig még a GaAs-nél is magasabb működési frekvenciát tesz lehetővé.

A további kísérletek azt mutatták, hogy a GaAs és az InP lehet egy-egy szilárd oldat-sor alapja, így jöttek létre a GaAlAs, GaAsP, GaInAs, a GaInAsP. Ezek az anyagok már a "molekuláris tervezés" segítségével állíthatók elő, az összetétel függvényében változó - és változtatható - tulajdonságokkal. Ezek az anyagok ma még mikrohullámu integrált és diszkrét elemek előállítására csak laboratóriumi körülmények között alkalmasak.

3. Új jelenségek

A fentiekben említett anyagokon sok érdekes új jelenséget írtak le. Ezek közül igen sok ma még nem kerül mikrohullámu eszközökben alkalmazásra. A jelenségek másik csoportját már kezdik alkalmazni. Ezek közül érdekes, s nagyon perspektivikus, az eszközök méreteinek csökkenéséből adódó jelenségek csoportja, amelyek közül röviden bemutatunk néhányat.

A félvezető technológia fejlődése lehetővé tette, hogy $0,01 \dots 0,5 \mu\text{m}$ közötti méretű tartományokat alakítsanak ki. Így vált, illetve válik lehetővé, hogy egyre gyorsabb működésű eszközöket készítsenek. A méretek csökkentésével nőtt az adott tartományra eső elektromos térerő nagysága is. A térerő ráadásul igen gyakran nagyon gyors egyszeri vagy periódikusan változó függvényt követ. Az ilyen körülmények között működő eszközök működése és modellezése megköveteli azt, hogy kritikailag megvizsgáljuk azokat a feltételezéseket, amelyeket az eszközök leírásánál alkalmaznak. A vizsgálatot két mérettartományban végeztük el. A gyakorlatban már kiterjedten alkalmazott, ezért jobban ismert $0,1 \dots 0,5 \mu\text{m}$ -os tartomány lesz az első. Az ettől kisebb méretű, gyakorlatban még nem alkalmazott eszközök analízise lesz a második lépés.

2.2. táblázat

Néhány dielektrikum összehasonlítása mikrohullámu áramkörök hordozója szempontjai szerint

Anyag	Felületi érdesség	Veszteség $10^4 \cdot \operatorname{tg} \delta$ 10 GHz-en	Dielektro- mos állan- dó ϵ	Hőveze- tés /W/cm C°/
Al ₂ O ₃ /99,5%/	0,25-10	1-2	10	0,3
Zafir	0,25	1	9,3-11,7	0,4
Kvarc	0,25	1	3,8	0,01
Be ₂ O ₃	0,5-10	1	6,6	2,5
Félszigetelő GaAs	0,25	16	13	0,3
Si	0,25	10-100	12	0,9

2.3. táblázat

A GaAs legfontosabb tulajdonságai szobahőmérsékleten ($T=300\text{ K}$)

Paraméter	Jelölés	Mértékegység	Mérőszám
Sűrűség	ρ	g/cm^3	5,317
Rácsállandó	a	nm	0,565325
Molekulasúly	M	AMK	144,642
Lineáris hőtágulási együttható	α	K^{-1}	$5,73 \cdot 10^{-6}$
Fajlagos hő	c_p	J/gK	0,327
Effektív Debye-hőmérséklet	Θ	K	360,-
Hővezetés rácskomponense K_L		W/cmK	0,55
Statikus dielektromos állandó	ϵ	-	12,85
Törésmutató	n_∞	-	3,299
Sávszélesség a direkt átmenetnél	ϵ_i	eV	1,423
Sávszélesség X_7-X_6 között	ϵ_s	eV	0,40
Saját koncentráció	n_i	cm^{-3}	$2,25 \cdot 10^6$
Saját vezetés	σ_i	$\text{ohm}^{-1}\text{cm}^{-1}$	$3,0 \cdot 10^{-9}$
Drift elektronmozgékony-ság	μ_n	cm^2/Vsec	8000
Drift lyukmozgékony-ság	μ_p	cm^2/Vsec	320

2.4. táblázat

A 0,5 μ m-os kapuelektródás, azonos geometriájú Si és GaAs MESFET-ek összehasonlítása.

Paraméter	Anyag	
	Si	GaAs
Maximális erősítési tényező 10 GHz-en	5,9 dB	12,8 dB
Zajtényező 10 GHz-en	5,8 dB	3,7 dB
Határfrekvencia	22 GHz	80-100 GHz

2.5. táblázat

A GaAs és InP összehasonlítása a MESFET típusú eszközök elméleti és mérési eredményei szempontjából.

Anyag		g_m mS/cm	C_{gs} pF/cm	f_t GHz
GaAs	Elméleti érték	977	11,9	13,1
	Mért érték	893	12,2	12,5
InP	Elméleti érték	1270	10,1	20,1
	Mért érték	1020	9,8	16,5

A transzport-folyamatokat általában a Boltzmann-egyenlet segítségével írják le. Ez lehetővé teszi, hogy az időbeli eloszlás-függvényt mind a valószínűség, mind a k -hullámszám térben meghatározzuk. Az adott, időben változó elektromos térerő, a sávszerkezet és a szórási mechanizmusok ismeretében meghatározható lesz a töltéshordozók átlagos sebessége és energiájuk. A megoldást általában iteratív módszerekkel végzik, vagy a Monte Carlo módszert alkalmazzák. Az így leírt ut akkor járható, ha a Boltzmann-egyenlet alkalmazható, azaz:

- létezik effektív tömeg és sávszerkezet,
- a töltéshordozók ütközése mind térben, mind időben rövid,
- a szórási mechanizmusok az elektromos térerőtől függetlenek.

A félvezető eszközök jelentős részében a méretek lényegesen meghaladják az elektron szabad uthosszának sokszorosát és a működési frekvenciájuk kisebb mint 30 GHz. Ezekben az eszközökben az elektron szabad uthossza alatt a térerő időbeli és térbeli változása elhanyagolható. A transzportfolyamat jellemzői ebben az esetben csak a térerő helyi értékétől függenek. Ha ezekre az eszközökre nagyobb, mint 30 GHz-s jel jut, vagy kapcsoló üzemben néhány pikoszekundumos jelet kell feldolgozni, akkor a Boltzmann-egyenlet megoldásánál már az eloszlás-függvény időbeli változását figyelembe kell venni. A mikrohullámu félvezető eszközök jelentős részében azonban a működési frekvenciából adódóan olyan kis mérettartományokat kell kialakítani, ahol a geometriai méretek már összemérhetők az elektron szabad uthosszával. A mikron és a szubmikronos tartomány az, ahol ugyan a Boltzmann-egyenlet még alkalmazható, de már nem minden esetben (pl. a heteroátmenetekben nem), de az egyenlet megoldásánál már figyelembe kell venni a kis idő és térintervallumokat.

Ruch 1972-es eredményei irányították a figyelmet erre a problémára. Többek között kimutatta, hogy az elektronok sebessége Si-ban és GaAs-ban lényegesen nagyobb lehet, ha szubmikronos tartományban vizsgáljuk a jelenséget. Ezáltal az eszközök működési jellemzői kedvezőbbek, mint azt a klasszikus leírásból várták. Ezt a jelenséget sebességtullövésnek (overshoot) nevezzük. Ezt a jelenséget később Ge-ra és InP-ra is meghatározták. A jelenséget vizsgálták egydimenziós és kétdimenziós analízis segítségével. Az elvégzett számítások és mérések azt mutatják, hogy az elektronok

sebessége átmeneti folyamat eredményeképp közelíti meg a térerősségnek megfelelő stacionárius határsebességet. A jelenség térerőfüggő.

A gyakorlatban természetesen igen lényeges az az eset, amikor az elektronokat egy állandó térre szuperponált szinuszos térerő gerjeszti.

Az

$$E(t) = E_0 + E_1 \sin(\omega t) \quad 3.1.$$

térerő hatására lezajló folyamatokat a μ^x komplex mozgékonyság bevezetésével vizsgálhatjuk, azaz

$$v_\omega = \mu^x E_1 = (\mu' + j\mu'') E_1 \quad 3.2.$$

ahol v_ω a Fourier-transzformált driftsebesség-időfüggvény. Nagyobb frekvenciákon a töltéshordozók két ütközés között jelentősen gyorsulhatnak vagy fékeződhetnek és így a kapott eredő mozgékonyság lényegesen különbözhet a kisfrekvenciás értéktől. A jelenség nagyobb frekvenciában már igen jelentős hatást gyakorol az eszköz működésére, ami a kimenő teljesítmény csökkenésében jelentkezik, mivel a félvezető mintegy abszorbeálja a mikrohullámot. A jelenség főleg nagyjelű üzemmódban a határfrekvencia jelentős csökkenéséhez vezet. Ehhez csatlakozhat még (pl. a Gunn-jelenségnél) a völgyek közötti átmenet véges idejéből származó "késés" is.

Az eddig vizsgált esetben a periódikus gerjesztés volt vizsgálatunk tárgya. Vizsgáljuk meg azt az esetet, amikor egy GaAs tömbre statikus térre szuperponált igen rövid (1-2 psec) impulzust adunk. Mivel a statikus tér kicsi (2 kV/cm) így a töltéshordozók a Γ völgyben maradnak. Az átlagos energia értéke az egyensúlyihoz, a mozgékonyság ohmos esetben előálló értékéhez van közel, így a driftsebesség nagy. A gerjesztő impulzus felfutásának befejeződése után a mozgékonyság nagy, és sebességtulólvés figyelhető meg. Az impulzus gerjesztése után 1 psec-al bekövetkező állapotban az energia már elérte stacionárius állapotát és nagy mennyiségű töltéshordozó került az X völgyekbe. A nagy szóródási valószínűség és a megnövekedett effektív tömeg miatt a mozgékonyság igen lecsökken, bár az elektromos térerő nagy. Az impulzus megszűnése után néhány tized psec-al az energia még nem csökkent le, a mozgékonyság is kicsi maradt és mivel az elektromos térerő is lecsökkent, így a driftsebesség igen

lecsökken. Ezt a jelenséget sebesség-alólövésnek (undershoot velocity effect) nevezzük. Akkor lép fel, ha a kezdeti energia nagyobb mint a stacionárius, amely az elektromos térerő kezdeti értékének felel meg. A továbbiakban az idő előrehaladtával az energia lecsökken, a töltéshordozók visszajutnak a Γ völgybe, a mozgékonyág és a driftsebesség megnövekedik, és visszaáll az eredeti állapot.

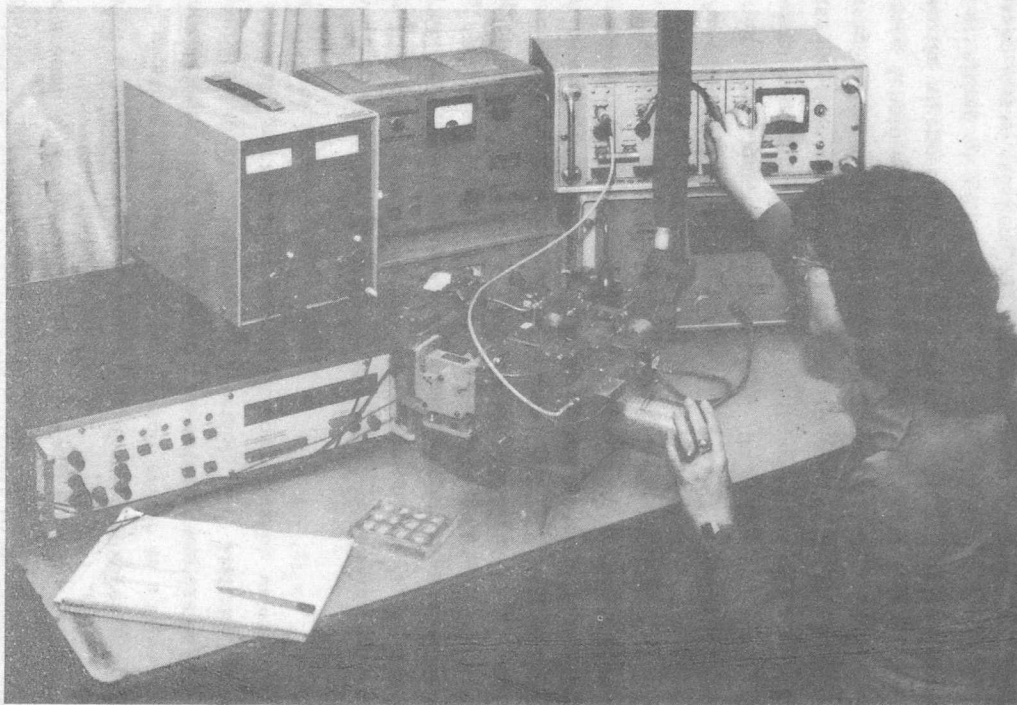
Mint a fentiekben megmutattuk, a sebesség-tullövés a félvezetőbe injektált elektronok, a félvezetőkre kapcsolt erőtér és a félvezetőnek magának a kölcsönhatására jön létre. Az elektronok mozgása a fononokkal való kölcsönhatás következtében egyre szórtabb lesz, ezáltal a sebességet határoló szóródási mechanizmus energiáját egyre kisebb valószínűséggel éri el, így a tullövés lecseng.

Mint annyi más ötletet, az ütközésmentes elektronmozgást a félvezető rácsban is Shockley vetette fel. Az akkori idők félvezető technológiája nem tette lehetővé olyan tiszta anyagok elkészítését, amelyekre ez teljesülhetett volna. A ma megvalósítható anyagparaméterek és méretek ezt már lehetővé teszik.

A sebességtullövés során – mint ezt megmutattuk – kezdetben termikus egyensúlyban levő elektronok átlagos energiája a gerjesztő impulzus végére eléri a völgyek közötti energiakülönbség értékét.

Az elektronok ballisztikus mozgásában lévő előnyöket jobban ki tudjuk használni, ha a gerjesztést igen rövid, de nagy amplitudójú gerjesztő impulzussal végezzük. A gerjesztő impulzus hosszát úgy választjuk meg, hogy a lecsengések az energia ne érje el a völgyek közötti energiakülönbség nagyságát. Így a szórás jelenségek nem lépnek fel, így igen nagy driftsebesség érhető el, miközben a sebesség-eloszlás is igen éles marad. A gerjesztés kikapcsolása után valamennyi töltéshordozó mozgása ballisztikus, mint a hajtóművek nélkül repülő lövedéké. A gyorsítás során nyert nagy sebesség lassan csökken, így viszonylag nagy távolságot tesznek meg a töltéshordozók rövid idő alatt. Az elvégzett számítások azt mutatják, hogy az átlagos sebesség értéke ebben a ballisztikus esetben kétszeres lehet, mint a sebességtullövés esetében.

Nagyobb méretű eszközöknél az ütközés meghatározó, a kisebb eszközök esetében ($\sim 0,1 \mu\text{m}$) a ballisztikus transzport.



Mikrohullámu mérőösszeállítás

További, ma még kevésbé ismert problémák jelentkeznek, ha az eszköz-méret $0,1 \mu\text{m}$ alá esik, vagyis a jelen szakasz elején említett második esetben. Ha a méretek a $0,02 \mu\text{m}$ nagyságrendjébe esnek, a Boltzmann-egyenletek már megszorításokkal sem alkalmazhatók, új jelenségek, így a kétdimenzionális kvantálás lépnek fel.

Összefoglalva megállapítható, hogy ezen az igen intenzíven vizsgált területen még sok új jelenség bukkanhat fel, amely új eszközök konstruálására is alkalmas lehet.

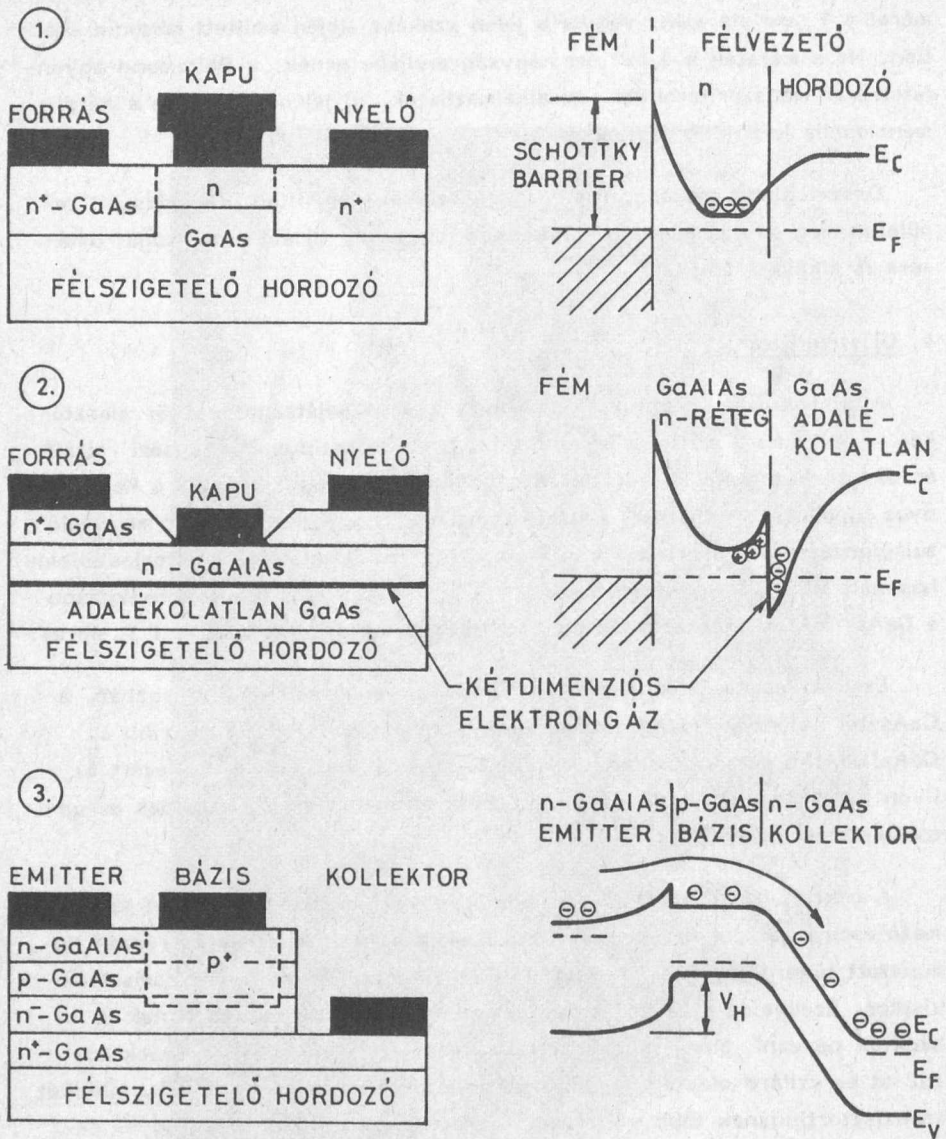
4. Új strukturák

A mikrohullámu technika kialakította a maga sajátos eszközválasztékát. A 4.1. ábra a három legfontosabb tranzisztortípus elrendezési rajzait és sávszerkezeti képét mutatja. Rögtön feltűnik, hogy hiányzik a hagyományos bipoláris tranzisztor, aminek az az oka, hogy nem sikerült megfelelő tulajdonságú p-n átmenetet előállítani GaAs-en. A jelenleg legelterjedtebben használt MESFET típust szemlélteti a 4.1.1. ábra. Ettől perspektivikusabb a GaAs/GaAlAs heteroátmenetet tartalmazó struktúra (4.1.2., 4.1.3. ábra).

Ezek az eszközök általában GaAs hordozóra növesztett, anyagában a GaAs-tól különböző rétegrendszeret tartalmaznak. A leggyakoribb a GaAs/GaAlAs rétegrendszer. Mivel a GaAlAs lézeralapanyag is, ezért az ilyen heteroátmenetet tartalmazó eszközök általában jól illeszthetők az optoelektronikai elemekhez.

A mikrohullámu technika szempontjából kétféle heteroátmenetet tartalmazó eszköz játszik fontos szerepet. Ezek a 4.1. ábra 1. és 2. részén bemutatott heteroátmenetes térvezérlésű és a heteroátmenetes bipoláris tranzisztor. Ezeket az eszközöket második generációs GaAs-eszközöknek is szokták nevezni. Megjegyezzük, hogy ilyen elektronikus alkatrészek az InP-ot és szilárd oldatait tartalmazó rendszerekből is készíthetők. Mindkét tranzisztortípusnak több változata ismeretes, ezek általában az egyes cégeknek meghonosított technológiáknak felelnek meg. Gyakran az azonos konstrukciókat még eltérő néven is nevezik, nem egészen függetlenül az e területen is folyó prioritási vitáktól.

Egy 1960-ban publikált munkában tűnik fel először az a feltételezés, hogy két eltérő sáv szélességű félvezető anyag összeillesztésénél a keske-



4.1.ábra: A három legfontosabb tranzisztor típus elrendezési rajzai és sávszerkezeti képe

nyebb sávszélességű anyag felőli oldalon elektron akkumuláció jön létre. A két anyag összeérítése – ami természetesen egymásra növesztést jelent – után az egyensúlyi állapotban jön létre az elektrontöbblet és az elektronhiány. Az elektrontöbblet kiterjedését tekintve kétdimenziós, mivel a rács és az elektronok közötti kölcsönhatás gyenge, másrészt az elektronok mozgását a heteroátmenetre merőleges irányban gátolja a potenciál-gödör, amelyben elhelyezkednek. Az így kialakuló kétdimenziós elektrongáz (2DEG) egy sor érdekes kvantum-mechanikai jelenség tanulmányozására is alkalmas.

A 4.1.2. ábra szerint létrejött strukturáról Esaki és Tsu kimutatták, hogy a Coulomb-szórás csökkeni fog. Az ilyen strukturák kutatásában a következő fontos lépést azok a kísérletek jelentették, amelyben nagyon vékony (~ 20 nm) GaAs és GaAlAs rétegeket növesztettek egymásra, így jött létre egy többrétegű szerkezet, amelyet később olyan módon adalékoltak, hogy a donor-szintek az egyik félvezetőben nagyobb abszolút energiaszinten helyezkedtek el, mint a másik félvezető vezetési sávja. Ez a töltések térbeli szétválásához vezetett, az elektronok a nagyobb elektron-affinitású félvezető vezetési sávjában akkumulálódtak. Az így létrejött strukturákban az elektronmozgékonyosság értéke lényegesen meghaladta az azonos adalékolású GaAs-ben mérhető értéket, amit az elektronok és a szóródási centrumként szereplő donoratombok szétválasztásával magyaráztak. Az adalékolás lehet homogén, azaz mindkét réteget adalékolják, vagy csak az egyiket adalékolják ("uniformly" és "modulation doped" szerkezetek). Az így kialakított strukturákból 1980-ban a Fujitsu (Japán) és a Thomson-CSF (Franciaország) cégek készítették el az első tranzisztort. Ezekre a strukturákra azóta többféle elnevezés született. Némelyik a tulajdonságra (nagy mozgékonyság), mások az adalékolásra (szelektíven adalékol) utalnak. Mi a továbbiakban a HEMT elnevezést fogjuk használni. (High Electron Mobility Transistor)

A HEMT eszközökben tehát a nagy mozgékonyság értéke és a nagy töltéshordozó koncentráció egyidejűleg létezhet. A mozgékonyság értéke 77K-nál 15-20-szorosa a MESFET-en mérhetőnek, de szobahőmérsékleten is kétszer nagyobb a két összevethető érték. Ebből azonban nem következik az, hogy a HEMT 15-20-szor gyorsabb lenne. Ennek az a magyarázata, hogy a rövidcsatornás MESFET-ben a nagyfrekvenciás paramétereket az elektron sebessége határozza meg. A mozgékonyság az ellenállás csökkenésében jut

szerephez, így közvetlenül a sebességet nem befolyásolja. A stacionér üzemmódban az elektronsebesség a GaAs-ben a koncentrációtól alig függ, a $10^{13} \dots 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ -os tartományban 30 %-ot változik csak, azonban a rövidcsatornás ($\sim 1 \mu\text{m}$) MESFET-ben az elektron sebességét még más tényezők is befolyásolják. Elmondható az is, hogy a sebesség-tullövés a HEMT-ben jelentősebb szerepet játszik, mivel az induló elektronsebesség nagyobb, vagyis itt is mint a rövidcsatornás MESFET-ben az elektron sebessége és nem a mozgékonyosság játssza a döntő szerepet.

A HEMT munkapontját úgy választják meg, hogy a Schottky-elektroda és az adalékolatlan GaAs közötti tartomány teljesen kiürített legyen. Így az eszközön átfolyó áram csak a GaAs/GaAlAs határfelületénél levő 2DEG-től függ. Mivel itt a mozgékonyosság nagy, így az eszköz transzkonduktanciája is nagy lesz. Ha azonban az előfeszítés olyan, hogy a GaAlAs-rétegben is folyik áram, akkor a mozgékonyosság lecsökken. Így tehát az eszköz lényegében olyan térvezérlésű tranzisztornak tekinthető, amelyben két csatorna van úgy párhuzamosan kötve, hogy mindkettőt ugyanaz a kapuelektroda vezérli. Ez azt is jelenti, hogy a kétféle csatorna kétféle telítési feszültséget fog jelenteni.

A HEMT-típusú eszközöket alkalmazzák diszkrét eszközként is. Ha MMIC-ben alkalmazzák, akkor jó felületkihasználást tesz lehetővé. Az áramfogyasztás is kedvező, hozzávetőleg 1 mW/kapu , ami az LSI szintű áramkörök szempontjából már megfelelően kis érték. A legegyszerűbb inverter kapcsolás úgy készül, hogy egy E-HEMT a meghajtó és egy D-HEMT a terhelés. Ez pozitív kapu és pozitív táp feszültséget igényel. Így egy tápfeszültséges lesz a rendszer és a direkt csatolás alkalmazható.

Összefoglalva megállapítható, hogy igen perspektivikus, de fejlődésének még csak a kezdetén tartó eszköz a HEMT. Mind analóg, mind digitális technikai alkalmazása igen jelentős eredményeket ígér, bár a megvalósított eszközök még elvi határaiktól messze elmaradnak.

Az injektálás hatásfokának növelése nagy sávzélességű félvezető emitter alkalmazásával olyan elvnek bizonyult, amelyet ugyancsak jó husz évvel a felvetés után valósítottak meg, de akkor egycsapásra sokatígérő eredményeket hozott. A Shockley által 1948-ban szabadalmaztatott elvet Kroemer később továbbfejlesztette. A GaAlAs/GaAs heteroátmenetet tartalmazó esz-

közök kétféle, jól bevált technikával készíthetőek, ez az MOCVD és az MBE. Kétféle típusuk van, ez az abrupt és a fokozatos átmenetet tartalmazó struktúra. A meredek átmenetet tartalmazó struktúrában a sávszerkezetben erős inhomogenitások lépnek fel. Ezek méretei az anyagban levő Al mólarányának növelésével növelhetőek, a felület közelébe bevitt akceptorokkal csökkenthető. Az elektron és a lyuktranszport a meredek átmenetet tartalmazó struktúrában lényegesen különbözik a homoepitaxiás rendszertől. A rendszerben ballisztikus transzportjelenségek is felléphetnek.

A fokozatos átmenetet tartalmazó struktúrákban a transzportfolyamatok egyszerűbbek, lényegében hasonlítanak a homoepitaxiás struktúrához.

A bipoláris eszközök áramköri alkalmazása megkezdődött. Ezek az áramkörök szobahőmérsékleten is kiváló tulajdonságokat mutattak. MMIC-ben az alkalmazás még a kezdeti lépéseknél tart, de 1024 kapus logikai áramköröket már készítettek. Az ilyen típusu áramkörök várhatóan szervesen beépülnek az eszközválasztékba.

5. Összefoglalás

Jelen dolgozatban néhány olyan újdotságot mutattunk be, amely az elkövetkező években mind a diszkrét, mind a monolit mikrohullámu félvezető eszközökben nagy szerepet fog játszani.

Vékonyrétegszerkezetek tervezhetősége elemi
folyamatok ismerete alapján

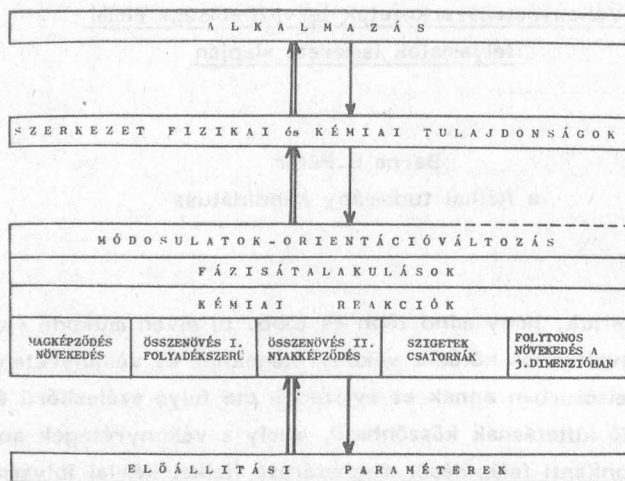
Barna B. Péter

a fizikai tudomány kandidátusa

Tapasztalhatjuk, hogy mind több és több, új elven működő eszköz és berendezés megvalósítása kötődik vékonyrétegekhez és vékonyréteg rendszerekhez. Ez elsősorban annak az évtizedek óta folyó széleskörű és egyre mélyebbre hatoló kutatásnak köszönhető, amely a vékonyrétegek anyagszerkezetének atomonkénti felépülését meghatározó fizikai-kémiai folyamatok sok részletét és törvényszerűségét feltárta. Jelentősen bővültek ismereteink a rétegek anyagszerkezete és fizikai-kémiai tulajdonságaik közötti összefüggésekről is. Mindennek eredményeként egyre inkább képesek leszünk arra, hogy előre meghatározzuk az adott feladatra legalkalmasabb réteg vagy rétegrendszer anyagszerkezetét és kémiai összetételét és azt, hogy homogén, vagy heterogén szerkezet lesz-e a kedvezőbb. Az ismeretfelhalmozásnak köszönhetően kezünkbe kerül annak kulcsa is, hogy a technológiák egyes lépéseit és paramétereit hogyan kell megválasztanunk ahhoz, hogy az anyag atomonkénti építkezése az előre elhatározott módon menjen végbe s a megtervezett anyagszerkezetet hozza létre (1. ábra). Érzékelhetjük azt a nagyszerű fejlődést is, ahogyan az anyag tudománya elvezet a szerkezeti anyagok atomi szinten történő megtervezésének és gyártásának tudományához. Érthető, hogy e két terület kapcsolódásának kiemelt jelentősége van az u.n. "csucs"-technológiák bevezetésében és ellenőrzésében.

A gyakorlat igazolta, hogy az új ismeretek szerzésére képes kutatásnak három pillérre kell épülnie. Egyik az a stratégia, mely elvezet az anyagot építő és alakító anyagszerkezeti folyamatok, jelenségek s azok irányíthatóságának - lehetőség szerint atomi szinten történő - megismeréséhez. A másik a szerkezet, a szerkezet változása és a fizikai-kémiai tulajdonságok közötti összefüggések feltárása. A harmadik pillér, az előző kettő nélkülöz-

hetetlen háttere, a vizsgálatokhoz szükséges kísérleti és mérőberendezések és módszerek családjának megléte, illetve kidolgozása.



1. ábra: A vékonyrétegtechnológiák problematikája. A felfelé mutató nyilak a hatások és függések irányát mutatják, a lefelé mutató nyilak a technológiák megtervezésének lehetséges menetét.

Pócza Jenő elévülhetetlen érdeme, hogy idejekorán felismerte: az anyag e különleges, vékonyréteggént atomi folyamatokkal felépíthető formája sajátosan új fizikai és kémiai tulajdonságok hordozója, s éppen ezért az ipari forradalmat jelentő új eszközök és technológiák egyre jelentősebb elemévé fog válni. Így a világ vezető laboratóriumaival egyidőben kezdte el a vékonyrétegek szisztematikus kutatását és kezdeményezte komplex vizsgálatokra alkalmas berendezések és módszerek kidolgozását. Ezzel vetette meg a vékonyréteggutató intézetünkben kifejlődött iskolájának alapjait.

A csoport keretében folyó több évtizedes kutatás szervesen épült a fent említett három pillérre, felhasználva a széleskörű hazai és nemzetközi együttműködésben adott lehetőségeket. Meghatározó lépés volt a kondenzáció és a rétegépülés elemi folyamatainak közvetlen vizsgálatára alkalmas ultranagyvákuumu in situ kísérleti módszer és berendezés kidolgozása, majd folyamatos fejlesztése és beépítése a transzmissziós elektronmikro-

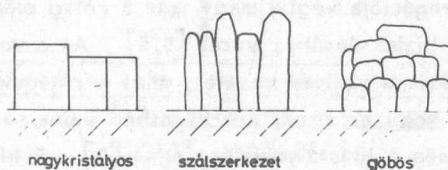
szkópba [1,2,3]. Ezzel a vékonyrétegkutatás egyik leghatékonyabbnak bizonyult s egyes vonatkozásaiban egyedi módszere került a kutatócsoport birtokába. E kísérletek feltárták a gőz-folyadék-kristály fázisátalakulás jelenségét, törvényszerűségeit [4], a szemcseösszenövés és annak során végbemenő átkristályosodás jelenségeit és azok szerepét a kristálytexturák kialakulásában [5]. A szennyezőhatások vizsgálata során alapvetően új jelenségek tárultak fel. Kimutatható volt, hogy az idegen, s a rácsba be nem épülő részecskék szegregációja végbe megy már a réteg előállításakor s ez általában új fázisok kialakulásához vezet [5,6]. Az amorf félvezető rétegek vizsgálata kimutatta a szálszerkezetet, mint a rétegekre jellemző morfológiát, valamint azt, hogy az amorf szerkezetben valós szerkezeti átrendeződés mehet végbe még a kristályosodás előtt [7]. E kísérletek feltárták a szennyezés és a kristályosodás kinetikája s formája közötti összefüggést [8]. A szerkezetvizsgálattal egyidejűleg végzett elektromos mérések új információkat nyújtottak a vezetési mechanizmus és a szerkezet közötti összefüggésre [9,10]. Az elektronspektroszkópia és mintavékonnyítás területén folyó módszertani kutatás új vizsgálati módszerekhez [11, 12, 13], illetőleg gyártható berendezés kidolgozásához vezetett [14, 15].

E dolgozat bemutatja, hogy adalékolással előre megtervezett morfológiai és kristály-texturák állíthatók elő, s utal a vékonyrétegkutatás egyes időszaki kérdéseire.

KÜLÖNBÖZŐ NÖVEKEDÉSI MORFOLÓGIÁK ÉS TEXTURÁK ELŐÁLLÍTÁSA ADALÉKOLÁSSAL

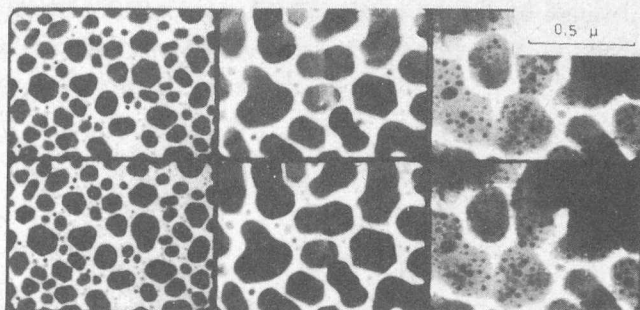
A különböző morfológiával/texturával rendelkező rétegek [16] iránt, azok igen különböző fizikai tulajdonságai miatt, egyre fokozódik a felhasználók érdeklődése. A szálszerkezetű ferromágneses rétegeket például a mágneses jelrögzítés egyik lehetséges anyagának tekintik [17]. A következőkben egy modellt mutatunk be annak szemléltetésére, hogy adalékok beépítésével miként lehet megtervezetten irányítani a kristálynövekedést s ezen keresztül a különböző növekedési morfológiák és texturák kialakulását [18, 19]. Példaként az oxigénnel adalékolat alumínium réteget választottuk, mert erre az anyaggárra vonatkozóan található a legtöbb felületkémi mérési adat. Növekedési morfológián a továbbiakban a réteg teljes vastagságát kitevő nagy kristályokból felépülő szerkezetet (a kristályok síkbéli mérete

közel azonos a réteg vastagságával vagy meghaladja azt), a szálszerkezetet (a kristályok síkbeli mérete sokkal kisebb, mint a réteg vastagsága, de a kristályok hossza lényegében a réteg vastagságával egyenlő), illetőleg az egymásra halmozódó kristályokból felépülő, ún. göbös szerkezetet értjük. (2. ábra)



2. ábra: A folytonos, vastagabb rétegekben megjelenő jellegzetes növekedési morfológiák: a) nagykristályos, texturált, általában $\langle 111 \rangle$ textura; b) szálszerkezet, általában texturált, a textura lehet $\langle 111 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ vagy $\langle 100 \rangle$; c) göbös szerkezet, a szemcséket idegen fázis burka fedi; textura nélküli szerkezet

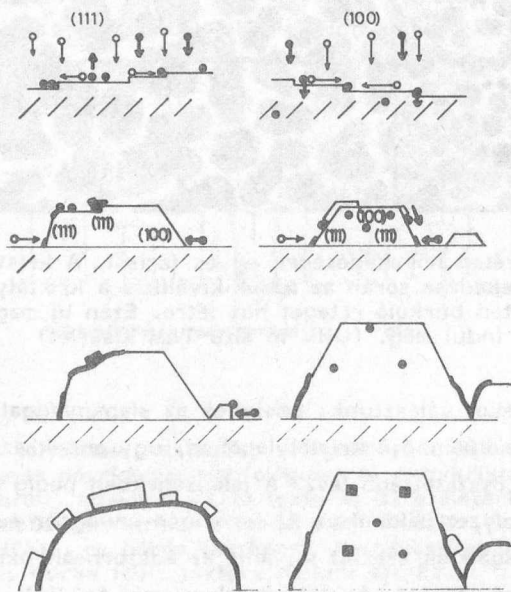
A vékonyrétegek előállításánál során a magképződés, a szemcsék összenövése és a kristálynövekedés (mind a különálló kristályok, mind az összefüggő réteg kristályainak növekedése) azok az elemi folyamatok, amelyek meghatározzák, hogy milyen lesz a réteg felületének és tömbi részének morfológiája s milyen a texturája (a kristályok irányitottsága). E folyamatokra kell tehát befolyást gyakorolnunk akkor, ha különböző morfológiát vagy texturát kívánunk előállítani. A hőmérséklet és a kondenzáció sebessége jól ismert paraméterek, hatásuk azonban korlátozott. A kísérletek feltárták, hogy ezek mellett a paraméterek mellett döntő lehet egy olyan adalék szerepe, amely a réteget építő atomi folyamatok során szegregálódik és helyileg felhalmozódva új fázist hoz létre. Ez az új fázis általában a felnövő kristályok felületén jön létre s azt részben majd egészben beboríthatja (3. ábra), [6]. Így máris nyomára bukkantunk egy olyan folyamatnak, amely alkalmas lehet a göbös szerkezet kialakítására. Itt az egyes szemcséket természetesen az adalék anyagából, vagy annak vegyületéből álló burok fedi és választja el egymástól.



3. ábra: In réteg növekedésének egyes fázisai. A kristályok növekedése során az adalék kiválik s a kristályok felületén burkoló réteget hoz létre. Ezen új magképződés indul meg. (UHV in situ TEM kísérlet)

Ha olyan adalékot választunk, amelynek az alapanyaggal való kölcsönhatása eltérő lesz a különböző kristálylapokon, úgy ennek az adaléknak a hatásmechanizmusa összetettebb lesz. A jelenségekben pedig anizotrópiát várhatunk. Ez a helyzet például az Al és oxigén anyagpár esetében [20]. A felületkémi vizsgálatok szerint ugyanis az adszorbeált oxigén beépül a legfelső monorétegbe az $\{110\}$ és $\{100\}$ lapokon, míg az $\{111\}$ lapokon kiül a felületre. Ez azt jelenti, hogy az alumínium kristályok növekedése során az oxigén szegregációja elsősorban az $\{111\}$ lapokon megy végbe s alakít ki a kristály kitüntetett felületrészein fedőréteget (nagy valószínűséggel oxidot) [21]. E fedőréteg meggátolja további Al adatom belépülését s így a kristály helyi növekedését. Ilyen formán az $\langle 110 \rangle$ és $\langle 100 \rangle$ irányitottságú kristályok zavartalanul nőhetnek, míg az $\langle 111 \rangle$ irányúak továbbépülését a felületükön kialakuló oxidréteg végül teljesen meggátolhatja (4. ábra). A másodlagos megképződéssel újrainduló kristálynövekedés és az oxigén ismételt szegregációja azonban újból záróréteget alakíthat ki, s így a növekedés-lezáródás ismétlődhet.

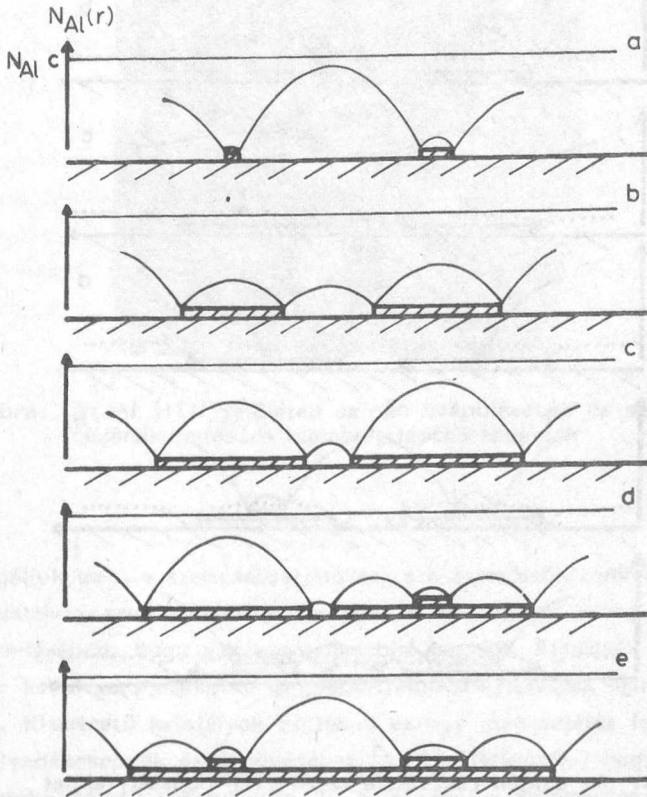
Az oxigén szegregációja egy egyszerű képpel érzékelhető, ha a kristálynövekedést kétdimenziós magok képződésével és monorétegek növekedésével írjuk le [22], s számolunk az oxigén felületi diffúziójával is. Oxigénmentes esetben ez a növekedés az 5. ábrán vázolt módon folyik.



4. ábra: Az oxigén részvétele az Al kristályok növekedésében
 a) növekedés iránya $\langle 100 \rangle$
 b) növekedés iránya $\langle 111 \rangle$

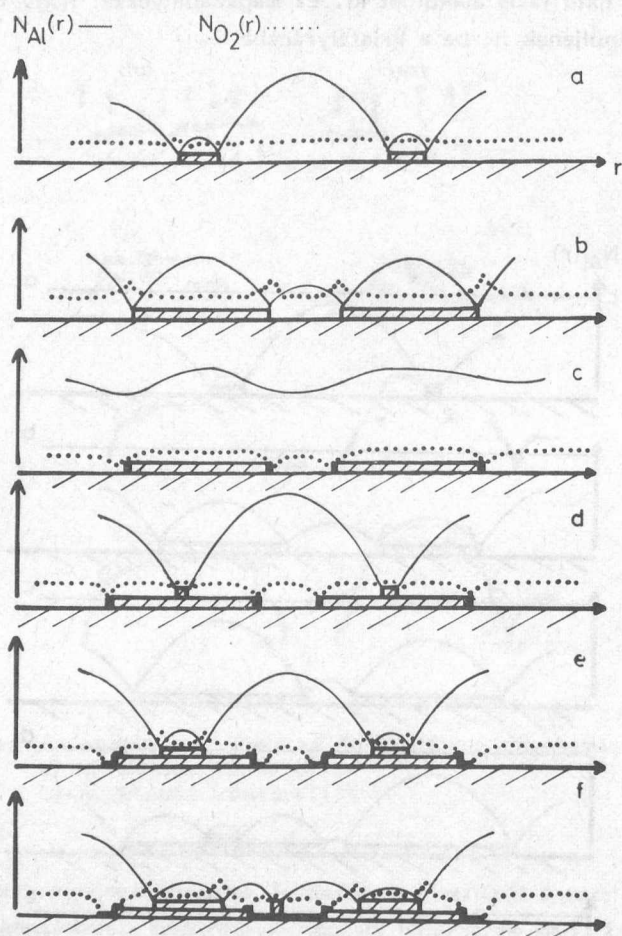
Az Al adatomok koncentrációjának felületmenti eloszlását s ezzel együtt az ismételt magképződést a monorétegek lépcsői határozzák meg. Ez a folyamat, ha aktiv magképző helyek nincsenek jelen, lényegében tisztán monoréteges növekedés, és a növekedési felület lényegében sík. Ha oxigén is jelen van, az a felületmenti diffúzióval szintén eljut a növekedési lépcsőkhöz, s ott adszorpcióval megkötődik. Feltételezhető, hogy a lépcsőknél zajlik le az a folyamat is, amely az oxigén szegregációjáért felelős. Ismeretes ugyanis, hogy az oxigén először gyengén kötődik, s így lehetőség van arra, hogy az oda beérkező Al adatom kiszorítsa azt. Helycsere történhet tehát az adszorbeált oxigén részecske és az Al adatom között [18, 23]. Ez a folyamat a lépcső mozgása során növeli az adszorbeált oxigén koncentrációját (6. ábra) s végül egy oxid mag kialakulásához vezethet. Ez az oxid mag most már

megköti a lépcsőn adszorbeált és diffúzióval odaérkező oxigént, s így a lépcsőt borító oxid fázis alakulhat ki. Ez megakadályozza, hogy további Al adatomok épüljenek itt be a kristályrácsba.



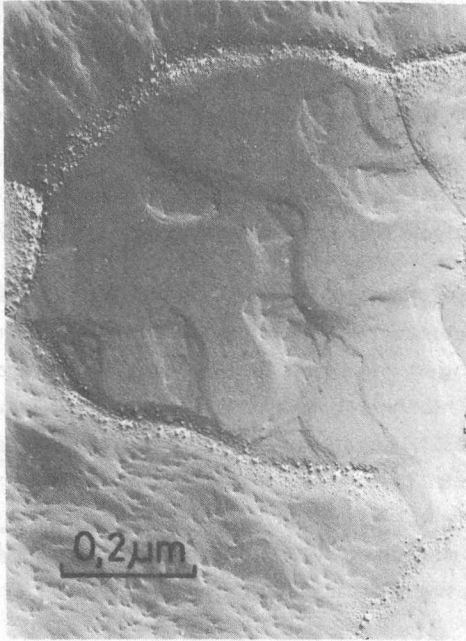
5. ábra: A monoréteges kristálynövekedés modellje.

A függőleges tengely az adatomok koncentrációját jelenti.



6. ábra: Az oxigén részvétele az Al {111} kristályfelület monoréteges növekedésében. A vastag vonal az oxid fázist jelenti.

Ilyen folyamatok ismétlődése alakíthatja ki a pontokban feltűzött körvekből álló, s valószínűen oxiddal fedett lépcsők csoportjait. Ilyeneket szemléltet a 7. ábra. Nagyobb oxigén koncentráció esetén e folyamatokkal alakulhat ki egy nagyobb felületre kiterjedő oxid réteg is.

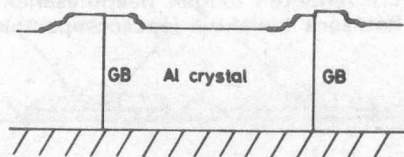


7. ábra: Az Al {111} felületen oxigén beépülésének és szegregációjának hatására kialakult lépcsőcsoportok

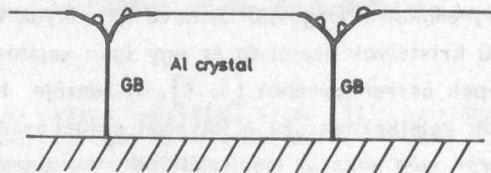
Vizsgáljuk most a szemcseösszenövést s a szemcseösszenövés eredményeként kialakuló szemcsehatárok szerepét az összefüggő réteg kristályainak növekedésében, hogy a képet teljesebbé tegyük. Szemcsék összenövésére akkor kerül sor, amikor a magokból felnövő kristályok érintkeznek egymással. Kisméretű kristályok esetében ez egy igen sajátos folyamat, hasonló a folyadékcseppek összenövéséhez [5, 6]. Jellemzője, hogy eredményeként egykristályok keletkeznek. Ez a folyamat oxigénmentes esetben a réteg növekedése során még sokszor megismétlődik, s nagyméretű egykristályok kialakulásához vezet. A kristályok orientációja is változik az ilyen összenövések során s fokozatosan kialakul a legkisebb szabad energiához tartozó $\langle 111 \rangle$ textura. Oxigénadalékolás esetében a kristályok felületén kialakuló oxid réteg erősen korlátozhatja e folyadékszerű szemcseösszenövést s így az $\langle 111 \rangle$ textura kialakulását is. Csökken a szemcseméret s a réteg különböző irányítottaságú kristályok halmaza lesz. Láttuk az előzőekben, hogy

ilyen esetben az $\langle 110 \rangle$ és $\langle 100 \rangle$ irányítottasú kristályok vannak a növekedés szempontjából kedvező helyzetben. Növekedésük zavarmentes, s így gyorsabb, mint a többieké. Esetenként tükriskristályok formájában nőnek ki a felületből [18, 23], s a rétegben az $\langle 110 \rangle$ ill. $\langle 100 \rangle$ textura jelenik meg, míg az $\langle 111 \rangle$ textura teljesen eltűnhet. Nagy oxigén koncentráció esetén már viszonylag kis méretnél minden szemcse lefedődik oxidburokkal, s rendezetlen kristályok halmazának formájában göbös morfológia fejlődik ki.

Nagyobb rétegvastagságok esetén a kristálynövekedés folyamataiban jelentős szerepet töltenek be a szemcsehatárok. Oxigénmentes rétegekben, vagy kismértékű oxigén adalékolás mellett a szemcsehatárok tiszták s nyomvonaluk a felületen hibahelyek sorozatát képezi. Ezek lesznek a monoréteges növekedés forrásai, következésképpen a növekedési lépcsők innét indulnak s a kristályok belseje felé mozognak. Ha kismennyiségű oxigén mégis jelen van, úgy azt a lépcsők magukkal sodorják. A szemcsehatárok továbbra is tiszták maradnak, viszont lépcsőcsoportok által határolt halmok keletkezhetnek követve a szemcsehatárok vonalát [24] (8.a. ábra)



a)



b)

8. ábra: A szemcsehatárok szennyezettsége és a növekedési topográfia közötti kapcsolat Al rétegben oxigén adalékolás esetén.

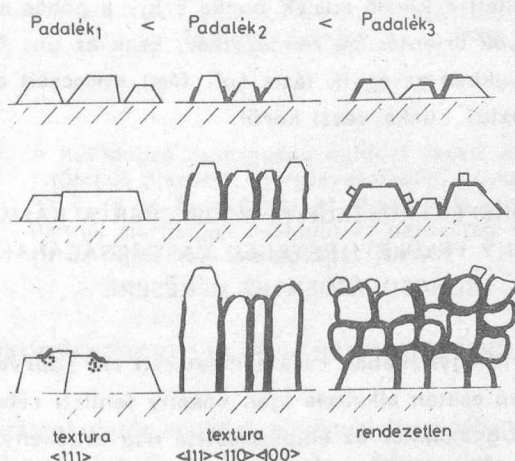
a) tiszta szemcsehatár

b) eredendően oxiddal fedett szemcsehatár.

A vastag vonal az oxid fázist jelenti

Ezzel szemben az eleve oxiddal borított szemcsehatárok az oxigén megkötésének lesznek kitüntetett helyei. Ide halmozódik fel a monoréteges növekedés során szegregálódó oxigén és építi tovább a szemcsehatárt már eredendően is borító oxidréteget (8.b. ábra). Ez az oxidréteg később ránőhet a szomszédos kristályok felületére is, s létrehozhatja a szemcsehatárok mentén gyakran megfigyelt széles, mély árkokat, amelyeket általában másodlagos magképződésből felnőtt kristályok dekorálnak [24] .

A 9. ábra foglalja össze azokat a hatásokat, amelyeket az adalék a rétegek növekedési morfológiájára és textura szerkezetére kifejt.



9. ábra: Összefüggés az adalék koncentrációja, jellege és a növekedési morfológiák, ill. texturák között

Adalék nélküli esetben, vagy igen kis koncentráció esetében a nagykristályos szerkezet alakul ki (9.a. ábra). Erre az $\langle 111 \rangle$ textura jellemző. A szemcsehatárok tiszták és ennek következtében mozgékonyak. Általában merőlegesek a réteg síkjára. Hőkezeléssel jelentős rekristallizáció idézhető elő. A réteg felülete viszonylag sima, azt nagyméretű $\{111\}$ kristálylapok alkotják. Kismennyiségű adalék jelenléte lépcsőcsoportokat hozhat létre. Az adalék kiválása ezek mentén történik.

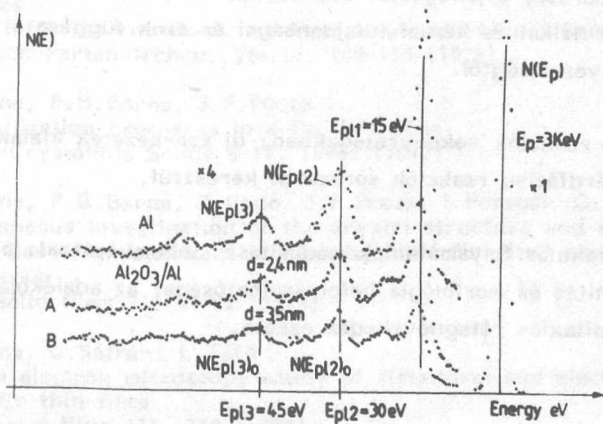
Növelve az adalék koncentrációját, az elsősorban a szemcsehatárokon válik ki, és a szálszerkezet kifejlődését segíti elő. (9.b. ábra). A textura változatlanul lehet $\{111\}$ irányu. Ha azonban az adalék és a réteg anyag közötti felületi kémiai kölcsönhatás függ a kristálylapok orientációjától, erős inhomogenitások lépnek fel. Egyes kristályok növekedése lényegesen felülmulhatja a többiekét, s így halmok, nagyobb koncentráció esetében tükriskristályok nőnek ki a réteg felületéből. Változik ezzel a textura iránya is. Az $\langle 111 \rangle$ texturát felváltja az $\langle 100 \rangle$ vagy $\langle 110 \rangle$ textura. A szálak átmérőjét az adalék koncentrációjának nagysága határozza meg. A szemcsehatárokat az adalékréteg stabilizálja.

Erősen adalékolva a réteget (9. c. ábra) a szemcséket már kis méretknél teljesen lefedheti a kiváló adalék burka s így a göbös morfológia alakul ki. A kristályok orientációja rendezetlen. Ezek az ún. "cermet" típusú rétegek, amelyekben az egyik fázis (pl. fém) szemcséit a másik fázis (pl. dielektrikum, oxid) burka veszi körül.

ÚJ ELEKTRONSPEKTROSKÓPIAI MÓDSZEREK ALKALMAZÁSA VÉKONY FELÜLETI RÉTEGEK VASTAGSÁGÁNAK RONCSOLÁSMENTES MÉRÉSÉRE

Az ellipszometria egymagában csak tökéletesen sík (durvaság < 2 nm) és hibamentes hodozó esetén alkalmas igen vékony felületi rétegek vastagságának mérésére. Ugyanakkor az ellipszometria nagyérzékenyséű eszköz a vastagság kis változásának meghatározásánál. Az alumíniumot borító természetes oxid film meghatározására roncsolásmentes elektronspektroszkópiai módszert fejlesztettünk ki, mely a plazmon energia veszteségi csucskok csillapításának mérését a rugalmas elektron szórás mérésével kombinálja [11, 12, 13].

A 10. ábra az MTA Izotóp Intézetével együttműködve, annak nagy energia feloldású elektronspektrométerével felvett plazmon energia veszteségi és rugalmas csucs $N(E_p)$ spektrumokat mutat, 1 hónapig tárolt, valamint 5 percig fellevegőzött Al_2O_3/Al rétegszerkezeteken. A második $N(E_{p12})$ és harmadik $N(E_{p13})$ plazmon csucskok bizonyultak alkalmasnak ezen vizsgálatokhoz, melyek az elektronok szabad uthosszának ismeretét is igénylik. Az utóbbit a rugalmas elektron szórás segítségével határoztuk meg. [13]



10. ábra: A különböző vastagságu oxiddal fedett alumínium-felületek plazmon energiavesztési csúcsai. Az E_{p2} és E_{p3} csúcs az abszorpció következtében jól mérhetően csökken az oxidréteg vastagságával (d az oxidréteg vastagságát jelenti)

A VÉKONYRÉTEGKUTATÁS NÉHÁNY IDŐSZERŰ KÉRDÉSE

A vékonyrétegekutatás eddigi eredményei lényegében feltárták az anyag atomonkénti felépítésének legfontosabb elemi folyamatait. A tudományterület belső fejlődése várhatóan előtérbe helyezi e folyamatok mélyebb megértését és befolyásolhatóságát, a lehetséges kölcsönhatások mechanizmusának tisztázását. Ezek közül vázolunk fel néhányat, amelyek elsősorban az anyagtudomány körébe tartoznak. Eredményeik azonban a technológiák fejlesztéséhez nélkülözhetetlen háttérismeretek lesznek:

- A többkomponensű rendszerek szerkezetkialakulásának feltárása: a felületi kémiai kölcsönhatások módosulása harmadik komponens jelenlétében; az atomi folyamatok során végbemenő szegregáció mechanizmusa és szerepe a kristályhibák kialakulásában; nagy stabilitású rétegezett rendszerek kialakításának lehetősége.

- A határfelületek és szemcsehatárok szerkezetének és szennyezettségének mélyebb megismerése; a jellegzetes szemcsehatárfolyamatok feltárása; a szemcsehatárok fizikai és kémiai tulajdonságai és azok függése a szerkezettől és szennyezettségtől.
- A szilárdfázisú reakciók vékonyrétegekben; új szerkezetek kialakításának lehetősége szilárdfázisú reakciók sorozatán keresztül.
- A szerkezetkialakulás folyamatainak módosítása ionbombázással: a szerkezet, homogenitás és morfológia befolyásolhatósága; az adalékolás irányíthatósága epitaxiás rétegnövekedés esetén.

Irodalom

1. A.Barna, P.B.Barna, J.F.Pócza
Design of a new vacuum deposition specimen holder for an electron microscope operating at 10^{-8} torr.
Vacuum 17, 219-221 (1967)
2. A.Barna, P.B.Barna, J.F. Pócza
Simultaneous investigations of structure and electrical properties of vacuum-deposited thin films by "in-situ" electron microscopy
Septième Congrès International de Microscopie Electronique
Grenoble, p.445-446 (1970)
3. A.Barna
Ultranagyvákuumu kísérleti berendezés vékonyrétegek szerkezeti és elektromos jellemzőinek szimultán mérésére az "in-situ" transzmissziós elektronmikroszkópiában
Kandidátusi értekezés, Budapest, 1980.
4. A.Barna, P.B.Barna, J.F.Pócza
Formation processes of vacuum-deposited indium films and thermodynamical properties of submicroscopic particles observed by "in-situ" electron microscopy
J.Vac.Sci.Techn. 6, 472-474 (1968)
5. J.F.Pócza, A.Barna, P.B.Barna, I.Pozsgai, G.Radnóczy:
In-situ electron microscopy of thin film growth
Proc. Sixth International Vacuum Congress, Kyoto (1974), and
Japanese Journal of Applied Physics, Supplement 2, Part 1,
525-532, (1974)
6. Barna B.Péter
Vékonyrétegek kialakulásának elektronmikroszkóppal követhető folyamatai.
Kandidátusi értekezés, Budapest, 1965

7. A.Barna, P.B.Barna, Z.Bodó, J.F.Pócza, I.Pozsgai, G.Randóczy
Structure ordering and electrical conduction of high purity amorphous
Ge films
Proc. Fifth Intern. Conf. on Amorphous and Liquid Semiconductors,
Garmisch-Partenkirchen, Vol.1., 109-115 (1974)
8. A.Barna, P.B.Barna, J.F.Pócza
Crystallization processes in a-Ge thin films
J.Non-Crystalline Solids 8-10, 36-44 (1972)
9. A.Barna, P.B.Barna, Z.Bodó, J.F.Pócza, I.Pozsgai, G.Radnóczy
Simultaneous investigation of the crystal structure and electrical
properties of crystallized Ge films by UHV "in-situ" electron
microscopy
Thin Solid films 23, 49-62 (1974)
10. A.Barna, G.Sáfrán, L.Tóth
In-situ electron microscopy study of structural and electrical changes
in Ni-Cr thin films
Thin solid films 116, 229 (1984)
11. P.B.Barna, Z.Bodó, G.Gergely, J. Ádám
Spectral ellipsometric, TEM and electron spectroscopic investigations
on oxidized aluminium thin films
Vacuum 36, 469, (1984)
12. G.Gergely, M.Menyhárd, A. Sulyok
Some new possibilities in non-destructive depth profiling using
secondary emission spectroscopy: REELS and EPES
Vacuum 36, 471, (1984)
13. G.Gergely
Elastic peak electron spectroscopy
Scanning 8, 203 (1986)
14. A.Barna
A new type ion milling equipment for sample preparation
Proc. 8th European Congress on Electron Microscopy
Budapest, 13-18 August, 1984. pp. 107-108
15. A.Valkó, A.Barna, P.Tüttő, L.Gosztola, P.Révész, S.Sándor
Electrical and morphological investigations of capacitor structures
for NMOS and CMOS circuits
MIEL 85. Ljubljana, 1985. p. 415-422
16. J.A. Thornton
Am.Rev.Matter.Sci. 7 239 (1977)
17. T.C. Arnoldussen
Proc. IEEE, 74 1526 (1986)

18. P.B.Barna
Impurity effects in the structural development of vacuum deposited thin films
Proc. 9th Int.Congr., Madrid pp. 382-396 (1983)
19. G.Radnóczy
Grain boundary process in thin films
Proc. 8th European Congress on Electron Microscopy,
Budapest, 13-18 August, 1984. pp.1229-1238
20. R.Michel, C.Jourdan, J.Castaldi, J.Derrien
Surf.Sci., 84 L509 (1979)
21. P.B.Barna, A.Barna, Z.Paál
Surface chemical phenomena influencing the growth of thin films
Acta Physica Hungarica 49 77-85 (1980)
22. T.Turez, J.P. Hirth, G.M. Pound
J.Cryst. Growth 18 20 (1973)
23. F.M. Reicha
Correlations between surface morphological features of Al films and presence of impurities
Kandidátusi értekezés, Budapest, 1981.
24. G.Radnóczy, P.B.Barna
Interaction of dislocations and grain boundaries in Al films
Journal de Physique 46 C4-429-433 (1985)

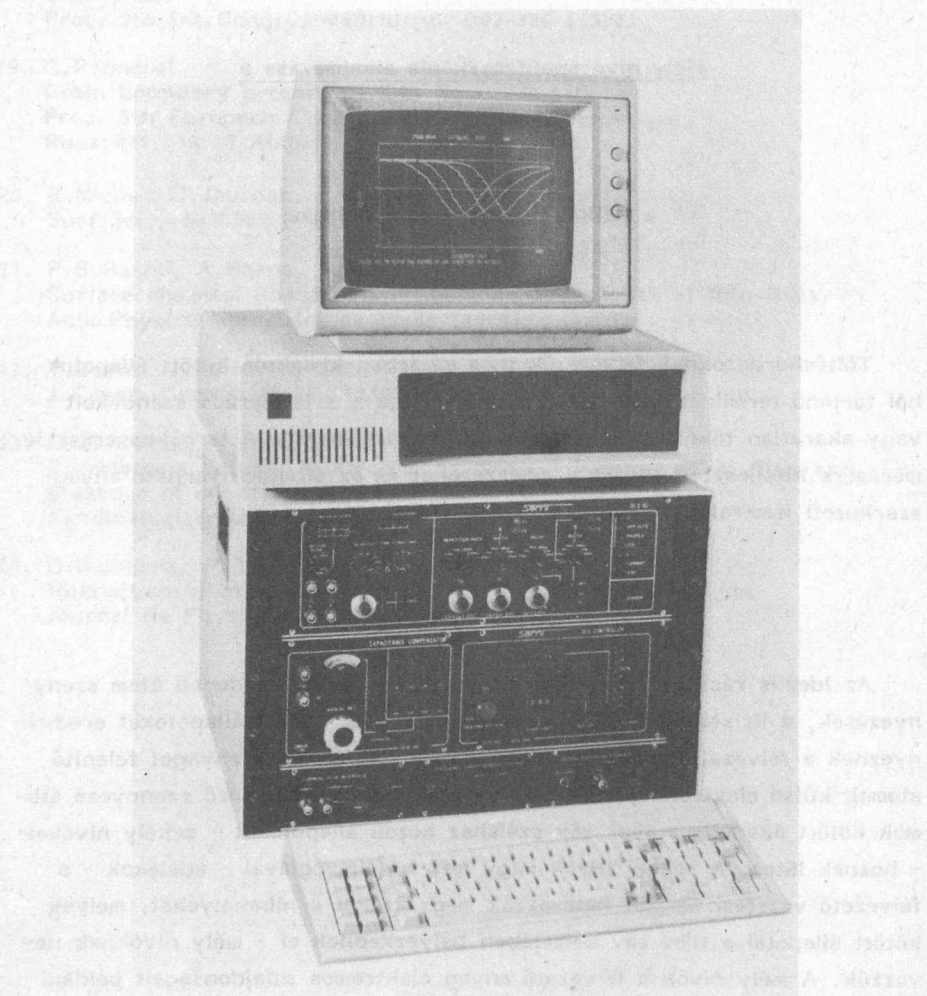
Mély nivó spektroszkópia alkalmazása a
félvezető anyagkutatásban

Ferenczi György
a fizikai tudomány kandidátusa

Töltéshordozóknak félvezetők tilos sávjában kialakuló kötött állapotokból történő termikus emissziójának detektálása a kristályrács szándékolt vagy akaratlan tökéletlenségeiről nyújt információkat. A termikus emisszió mérésére kifejlesztett kísérleti módszereket és az általuk nyerhető anyag-szerkezeti ismereteket tekinti át a dolgozat.

BEVEZETÉS

Az ideális rács szerkezettől való bármilyen eltérés: idegen atom szennyezések, a kristály pont hibái, diszlokációk stb. kötött állapotokat eredményeznek a félvezető anyagok tilos sávjában. A félvezető anyagot felépítő atomok külső elektronhéjától ezek egy elektronnal különböző szennyező atomok kötött állapotai a tilos sáv széléhez közeli állapotokat - sekély nivókat - hoznak létre. A sekély nivók vagy más terminológiával - adalékok - a félvezető vezetési típusát határozzák meg; azokat a hibahelyeket, melyek kötött állapotai a tilos sáv belsejében helyezkednek el - mély nivóknak nevezzük. A mély nivók a félvezető anyag elektromos tulajdonságait például a generációs-rekombinációs áram mértékét, nagyfrekvenciás zaját, nagy energia sűrűségű eszközöknél az eszköz élettartamát stb. döntő mértékben befolyásolják. A gyártási technológia során keletkező mély nivók (például a plazma marás, ionimplantáció, diffúzió stb. következtében) hátrányosan befolyásolhatják a félvezető eszköz tulajdonságait. A hőkezelési folyamatok során lejátszódó kristályhiba reakciók, a kristály növekedése során beépülő saját hibák vagy ezek komplexei, a kristályosodási folyamat finom részleteiről adnak számot.



Spektrométer félvezetők mélynívóinak meghatározására
(DLS-82E MFKI-Radelkis)

A fenti példák sarokkövekként jelölik ki azokat a területeket, amelyeken a mély nivók kutatása a félvezető anyagtudomány egyik legfontosabb vizsgálati módszerévé vált. A továbbiakban a mély nivók vizsgálatának kísérleti módszerei közül az egyik legfontosabbat: a tértöltés spektroszkópiát ismertetjük és alkalmazásának egyik jellegzetes példáját mutatjuk be.

TÉRTÖLTÉS SPEKTROSKÓPIA

A mély nivókat létrehozó hibahelyek koncentrációja jellegzetesen a 10^{10} – 10^{13} atom/cm³ tartományba esik, azaz kimutatásuk a hagyományos analitikai módszerekkel általában nem lehetséges. Ezért vizsgálatukra a "kutyaharapást szőrével" elv alapján jellegzetesen félvezető fizikai módszert kellett kidolgozni.

A mély nivók mint kötött állapotok elektronok vagy lyukak befogásával töltésállapotukat megváltoztatják. Ha sikerül a félvezető anyag egy részéből a szabad töltéshordozókat eltávolítani, úgy a mély nivók töltésállapotának megváltozása igen érzékenyen detektálható. Kiürült, azaz szabad töltéshordozó mentes tartomány p–n átmenet, Schottky átmenet stb. létrehozásával alakítható ki. A kiürült tartományon belül létrejövő tértöltést szabad töltéshordozók mély nivókon való befogódása megváltoztatja. A rendszer azonban a termikus egyensúlyi betöltöttségi feltételekhez vissza kíván térni, mely a megkötött töltéshordozók termikus emissziója révén következik be. A termikus emisszió a félvezető eszközön átfolyó áram megváltozásával [1], az eszköz kapacitásának tranziens megváltozásával [2, 3] vagy a félvezető minta teljes szabad töltéshordozó mennyiségének [4] tranziens változásával detektálható.

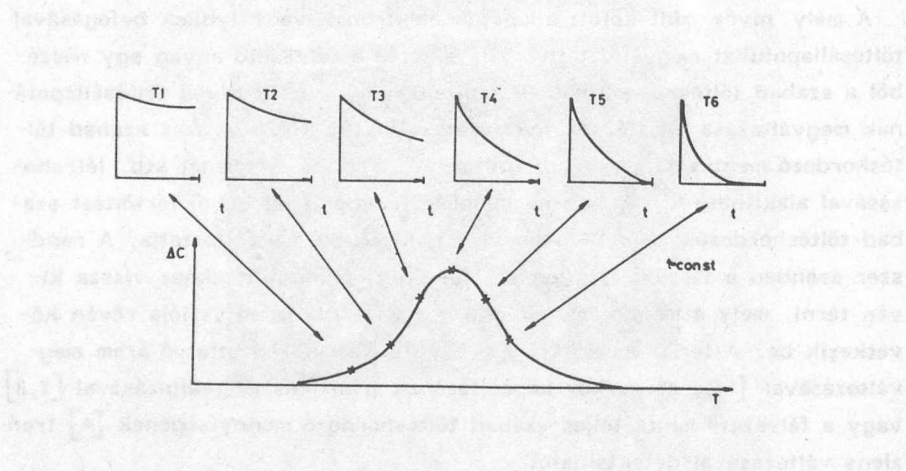
A mély nivók betöltésének legegyszerűbb módja a dióda rövidzárásával a kiürült tartomány pillanatnyi megszüntetése. Ugyanez a hatás érhető azonban el fénnnyel vagy bármilyen más sugárzással való kölcsönhatás esetén is.

A termikus emisszió időállandója a mély nivó aktivációs energiájára, azaz a tilos sáv szélétől energiában mért távolságára, a tranziens változás mértéke a nivó koncentrációjára, míg egy mély nivó teljes betöltéséhez szükséges idő a nivó befogási hatáskeresztmetszetére jellemző. Az össze-

foglaló névvel tértöltés spektroszkópiának nevezett kísérleti módszereket a termikus emissziót jellemző három paraméter minél pontosabb kísérleti meghatározására fejlesztették ki.

MÉLY NIVÓK TRANZIENS SPEKTROSKÓPIÁJA

A termikus emisszió detektálására kifejlesztett kísérleti módszerek közül azok terjedtek el a gyakorlatban, melyek a tranziens jelek feldolgozását spektroszkópikus megjelenítési formában szolgáltatják. A több lehetséges gyakorlati megoldás közül a legjobb jel/zaj viszonyt a Ferenczi és munkatársai [3] által kidolgozott lock-in jelátlagolást megvalósító megoldás biztosítja. A mérés elvét az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra: Hőmérséklet-pásztázásos MNTS mérés elve.

Különböző hőmérsékleten mért kapacitás tranziensek időállandójának változása a hőmérséklet függvényében. A lock-in integrátor négyszög súlyfüggvényével átlagolt tranziensek a hőmérséklet függvényében az MNTS spektrumot alakítják ki.

A hőmérsékletváltozás hatására változó időállandóju tranzienseket egy lock-in integrátor négyszög súlyfüggvénye átlagolja.

Az integrált jel:

$$S(\tau, P) = \frac{\Delta C_0 \tau}{P} (1 - \exp(-P/2\tau))^2 \quad /1/$$

ahol

$$\tau^{-1} = N_c \sigma_n V_d \exp(-E_\tau/kT)$$

a termikus emisszió időállandója, és

ΔC_0 a maximális kapacitásváltozás

P a lock-in periódusideje

N_c vezetési sávbéli állapotsűrűség

σ_n befogási hatáskeresztmetszet

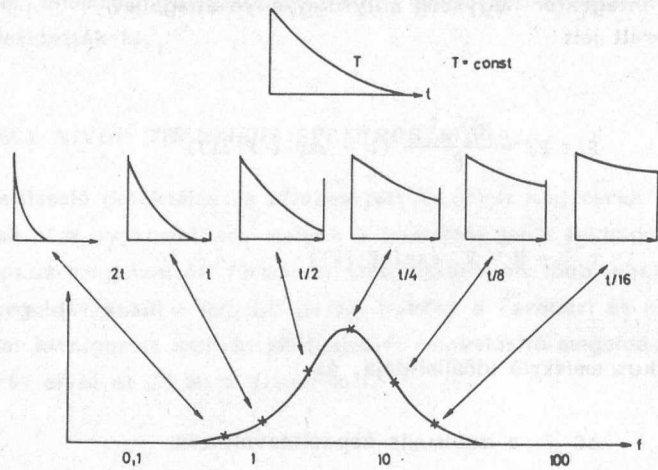
V_d termikus drift sebesség

E_τ a mély nivó aktivációs energiája

$S(\tau, P)$ értéke maximális, ha $P \approx 2,5\tau$

Az /1/ képletből következően a jel maximumot akkor is megtaláljuk, ha a minta hőmérsékletét állandónak választjuk, de a lock-in periódus idejét változtatjuk folyamatosan. Ezt az esetet a 2. ábrán szemléltetjük. A mérési módszert izotermikus MNTS módszernek neveztük el.

Az MNTS módszer előbbiekben bemutatott elve a tranziens jelek alkalmas feldolgozásának módszerét mutatta be. A gyakorlatban a jelfeldolgozás egyaránt használható kapacitás- és áram tranziensek vizsgálatára. Az áram tranziens amplitúdója azonban arányos a mindenkor emissziós valószínűséggel, ami a kiértékelést bonyolultabbá teszi, mint kapacitás tranziensek esetén, ezért a gyakorlatban az MNTS módszer kapacitásmérésen alapuló változata terjedt el.



2. ábra: Az izotermikus frekvencia pásztázásos MNTS mérési elve
 a) Mérendő kapacitás tranziens
 b)-g)-ig Ugyanez a kapacitás tranziens fokozatosan csökkenő integrálási időalapot használva
 h) Lock-in integrátorral átlagolt tranziensekből kialakuló MNTS jel

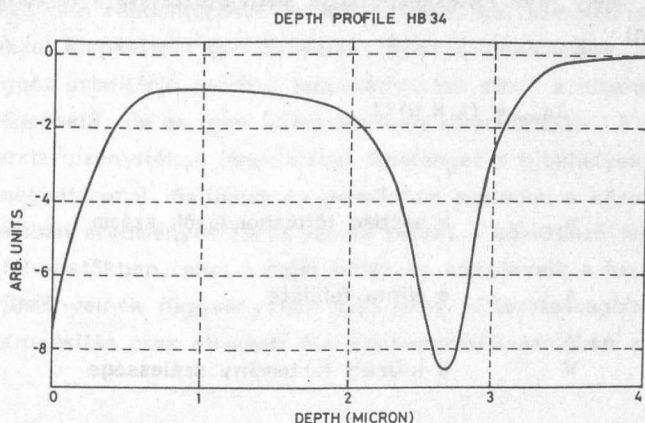
Az MNTS módszer legfontosabb előnyei között érzékenységét kell említeni. Az általunk kifejlesztett SemiTrap DLS-82E típusnéven forgalmazott műszer esetén

$$\frac{N_T}{N_D} \geq 10^{-6} \quad /2/$$

érzékenység érhető el, ahol N_T a mély nivók koncentrációja, míg N_D -vel a kompenzálatlan adalék koncentrációt jelöltük.

A /2/ összefüggés szerinti kimutatási határ azt jelenti, hogy pl. 10 Ωcm -es szilícium esetében 10^9 atom/cm³ koncentrációban jelenlevő szennyezések vizsgálhatóak.

Az MNTS módszer energia felbontása tipikusan 10 meV. Segítségével a mély nivók koncentrációja, befogási hatáskeresztmetszete, aktivációs energiája és mélységi eloszlása is vizsgálható. A 3. ábrán ez utóbbira mutatunk egy példát.



3. ábra: 300 keV-os protonokkal besugározott p-típusú szilícium mintán végzett mélységi profil mérés. A vizsgált centrum $E_V + 0,36$ eV mélységben található sugárzási károsodási centrum volt. A mért mélységi eloszlás megfelel a szórási elméletből számítható eloszlásnak.

Lényeges megjegyezni, hogy a mélységi felbontóképességet a félvezető anyag Debye hossza korlátozza csak, amely jellemzően 20 nm szilíciumban. A kapacitív MNTS módszer legfontosabb gyakorlati hátránya, hogy a vizsgálható emissziós időállandó tartomány a kapacitásmérő mérőjel frekvenciája által felülről korlátozott. Gyakorlati okokból a kapacitásmérő mérőjelét általában 1 MHz-re választják amiből következően a legrövidebb megfelelő érzékenységgel detektálható tranziens időállandója $100 \mu\text{s}$. A mérőrendszer termikus stabilitása miatt 10s-nél hosszabb időállandók mérése nem célszerű, így a gyakorlatban elérhető időátfogás öt nagyságrend.

A hőmérséklet függvényében végzett MNTS módszer elvi hátránya, hogy a mérés maga hőkezelés, amely kristályhiba reakciókat idézhet elő. Az izotermikus MNTS módszer ezt a hátrányt ugyan kiküszöböli, de az öt nagyságrendnyi időbeli átfogás nem elég a teljes tilos sáv tanulmányozására, egyetlen hőmérsékleten. Az [1] összefüggésből következően ehhez szilícium esetén szobahőmérsékleten kilenc nagyságrendnyi időbeli átfogásra lenne szükség. A korlátot tehát a termikus emisszió detektálásának módja

jelenti, azaz a kapacitásmérés. Könnyen belátható, hogy a tértöltési tartományban N_T mély nivó töltésállapotának megváltoztatása a tértöltési tartományon kívül

$$\Delta n_{FC} = (A N_T W) / 2 \quad /3/$$

ahol

n_{FC} a szabad töltéshordozók száma

A a minta felülete

W a kiürült tartomány szélessége

a szabad töltéshordozók számát a /3/ összefüggés szerint változtatja meg.

A szabad töltéshordozók számának megváltozása könnyen mérhető, ha a mintát mikrohullámu térbe helyezzük és vizsgáljuk a mikrohullámu abszorpció időbeli megváltozását. Ezt az új tértöltés spektroszkópiai módszert Mikrohullámu Abszorpciós Spektroszkópiának (MAS) neveztük el [4]. A MAS módszer, mivel a mérőjel frekvenciája 10 GHz szemben a kapacitás mérésnél használt 1 MHz-cel, lehetővé teszi az elméletileg megkívánt kilenc nagyságrendnyi időbeli átfogást, azaz alkalmas arra, hogy szobahőmérsékleten a teljes tilos sávot tanulmányozhassuk. Kimutatható, hogy a MAS módszer érzékenysége eléri, sőt ideális esetben meg is haladja a kapacitív MNTS módszer érzékenységét.

MÉLY NIVÓK AZONOSÍTÁSA

Az előzőekben röviden összefoglaltuk a tértöltés spektroszkópiai módszerek által nyújtott kísérleti lehetőségeket. Egyetlen -döntő fontosságú kérdés azonban megválaszolatlan maradt.

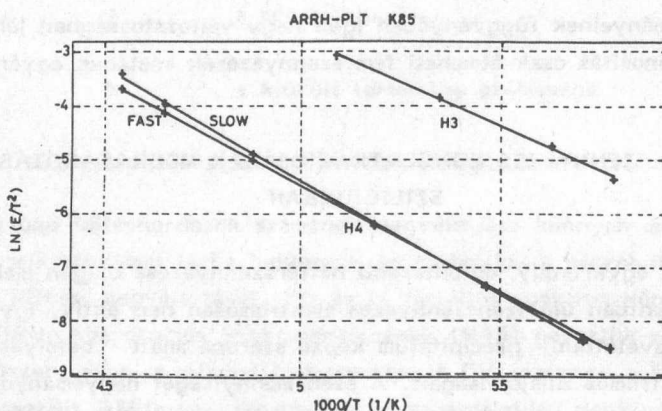
Az MNTS módszerek bármelyike a mély nivó alapállapoti aktivációs energiáját határozza csak meg, további információt nem szolgáltat a mély nivót előidéző szennyezésre, ugyanakkor a vizsgálat végcélja a mély nivót kiváltó szennyezés azonosítása lenne. Az MNTS módszer azonosításra közvetlenül nem alkalmas. Ez csak akkor lenne lehetséges, ha elméleti számításokkal meghatározható lenne egy szennyezés által létrehozott kötött

állapot alapállapot energiája. Sajnos az elméleti kutatások ilyen eredményekkel még nem rendelkeznek. Az MNTS méréseket szimmetria érzékeny vizsgálatokkal kiegészítve (pl. uniaxiális nyomás alkalmazása, az elektromos térfüggés orientáció szerinti tanulmányozása stb.) a hibahelyek azonosítása elvégezhető, de ez igen kevés esetben sikerült csak. A gyakorlatban közvetett bizonyítékok láncolatával lehetséges a hibahelyek kémiai természetét meghatározni. Szilícium és germánium esetében a közvetett bizonyítás általában eredményes (erre adunk példát a következő fejezetben). Vegyület félvezetőkben, ahol a saját hibák és komplexeik a kristálynövekedés körülményeinek függvényében igen nagy változatosságban jöhetnek létre, az azonosítás csak átmeneti fém szennyezések esetében egyértelmű.

SZÉN SZENNYEZÉS KONCENTRÁCIÓJÁNAK MEGHATÁROZÁSA SZILICIUMBAN

Szilícium egykristály legfontosabb háttérszennyezése oxigén mellett a szén. Rácspontban üllő szénszennyezés elektromosan nem aktiv, így jelenléte csak közvetetten – precipitátum képző szerepe miatt – befolyásolja a kristály elektromos tulajdonságait. A szén mennyiségét hagyományosan infravörös abszorpció mérésével határozzák meg, mely 10^{16} szén/cm³ határérzékenységig alkalmazható. A nagybonyolultságu integrált áramkörök gyártástechnológiája a korábbiaknál is nagyobb hibamentességet követel meg, s ezért szükségessé vált a szén szennyezés koncentrációjának nagyobb érzékenységgel történő mérése. Az általunk kifejlesztett módszer [5] hasznosítja azt a megfigyelést, hogy besugárzás hatására (elektron, proton stb) a rácspontban üllő szénatomok intersticiális helyzetbe kerülnek, szobahőmérsékleten mozgékonyvá válnak és elektromosan aktiv komplexeket hoznak létre. Az MNTS módszer segítségével az elektromosan aktiv komplexek jól vizsgálhatóak, azonban az eddigi vizsgálatok nem tudták eldönteni, hogy a legvalószínűbb komplexek közül ($C+O_i$ illetve C_s+C_i), melyeket elektron spin rezonanciával besugárzott mintákban egyaránt megfigyeltek, melyik képződik nagyobb valószínűséggel. A differenciális befogási hatáskeresztmetszet mérés elvét használva sikerült bebizonyítani, hogy két független állapot eredője idézi elő a korábbi vizsgálatokban $E_v+0,36$ eV aktivációs energiánál megfigyelt sugárzási károsodási centrumot. Megfelelő

betöltési szekvenciát használva a két állapot aktivációs energiáját és koncentrációját is lehetséges volt meghatározni. A 4. ábrán bemutatott Arrhenius plot bizonyítja, hogy a két különböző komplexből származó termikus emisszió valószínűsége olyannyira közeli, hogy az általunk bevezetett speciális technika nélkül szétválasztásuk hagyományos kísérleti módszerekkel nem volt lehetséges.



4. ábra: A $C_s + C_i$ (H_4 slow) és a $C + O_i$ (H_4 fast) centrumokból származó termikus emissziós valószínűség hőmérséklet-függésének Arrhenius ábrázolása. Összehasonlításul feltüntettük az MNTS spektrumban hagyományos mérési eljárással éppen elkülöníthető H_3 -as centrum Arrhenius plot-ját is.

Különböző szén és oxigén tartalmu mintákat vizsgálva a két állapot koncentrációjának háttérkoncentrációval való korrelációjából egyértelműen igazolni lehetett, hogy az $E_v + 0,37$ eV-os nívót a $C_s + C_i$ komplex, míg az $E_v + 0,34$ eV-os nívót a $C_s + O_i$ komplex hozza létre. Miután a mélyebb állapot koncentrációja és a kiinduló szén koncentráció között egyértelmű

összefüggés áll fenn, a $C_s + C_i$ komplex mennyiségének MNTS-sel való meghatározásából az össz szénkoncentráció is meghatározható. A látszólag bonyolult eljárás gyakorlati előnye, hogy a szén koncentráció mérésének határérzékenységét 10^{16} szén/cm³-ről 10^{12} szén/cm³-re változtatta.

Hivatkozások

1. B.W.Wessels
J.Appl.Phys. 47 1131 (1976)
2. D.V.Lang,
J.App. Phys. 45 3023 (1974)
3. G.Ferenczi, J.Boda and T.Pavelka
phys.stat.sol. a 94, K119 (1986)
4. G.Ferenczi, D.Huber, W.Jantsch, G.Brunthaler
Materials Science Forum 10-12, 521, (1986)
5. G.Ferenczi, C.A.Londos, T.Pavelka, M.Somogyi and A.Mertens
J.Appl. Phys. , megjelenés alatt

A perkolációtól a kvantum transzportig -
elméleti kutatások az MFKI-ban

Beleznay Ferenc
a fizikai tudomány kandidátusa

A Műszaki Fizikai Kutató Intézet, amint azt már a neve is sejteti, valamiféle közbenső helyen áll az alap- és alkalmazott kutatások között. Egy ilyen helyzetben levő Intézetben az elméleti kutatások szerepe nem pontosan ugyanaz, mint a kimondottan alapkutatásokra létrehozott kutatóhelyeken. Hazánkban számos olyan kutatással és fejlesztéssel foglalkozó intézmény van, ahol ez a viszony eléggé tipikus, ezért hasznos lehet az elméleti kutatások történetét és eredményeit, és az ebből levonható tanulságokat a fizikus közösség számára közreadni. Természetesen az Intézet 30 évéről egy rövid összefoglalóban nem lehet részletesen beszámolni, ezért előre is megértést kell kérni azoktól, akik biztosan jogosan hiányolják majd valamely terület említését. Ugyancsak érthető, hogy minden ilyen összefoglaló többé-kevésbé szubjektív, különösen a mondanivaló célzatos csoportosítása - az ebben az ismertetőben szereplő vélemény a szerző saját véleménye.

TÖRTÉNELEM

Hamarosan az MFKI létrehozása után, kb. 1960-ban felmerült annak a lehetősége, hogy az Intézet keretén belül egy erős elméleti csoportot hozzanak létre az akkor az országban még kevésbé művelt elméleti szilárdtestfizika tanulmányozására. Az igénnyel együtt rögtön az is világossá vált, hogy két ellentétes álláspont van ennek a csoportnak az Intézetben elfoglalandó helyével kapcsolatban.

Az egyik vélemény az volt, hogy az elméleti fizika, és annak alkalmazása a kondenzált rendszerekre (akkor még inkább csak szilárd testeket

mondtunk) olyan komplex és nehéz feladat, hogy legeredményesebben úgy művelhető, ha a megfelelő adottságu és elkötelezettségű kutatók (minimálisan 5-10 ember) egy szorosan együttműködő csoportot alkotnak.

Ezzel szemben állt az a vélemény, hogy az elméleti módszerek is hasonlóak a kísérleti technikákhoz, így az Intézet minden egyes, szakmai szempontok szerint elkülönülő részének szüksége van elméleti emberekre, ezért nem önálló elméleti csoportot kell létrehozni, hanem azt kell elérni, hogy az egyes részlegek elméleti problémáival foglalkozó kutatók között legyen szoros a kapcsolat. Ez a kapcsolat megtermékenyítheti a különböző feladatokkal foglalkozó kutatók munkáját, de nem adminisztratív, szervezési alapon, hanem a közös érdeklődésen és az emberi kapcsolatokon kell hogy alapuljon.

Bár mindkét elképzelés előnyeit és hátrányait hosszan lehetne sorolni, a történelmi tény megmarad, hogy az utóbbi elképzelés valósult meg, amelyet az Intézet akkori vezetése is támogatott.

AZ ELMÉLET ÉS A GYAKORLAT VISZONYA

Soroljuk most fel a teljesség és az időrendi sorrend igénye nélkül azokat az eredményeket, amelyeket az Intézetben elméleti eredményeknek tekintettünk és nézzük meg ezek kapcsán, miként valósult meg az az elvárás, hogy az elmélet és a gyakorlat kiegészíti egymást. A felsorolás során az egyszerűség kedvéért mindig többesszám harmadik személyt fogok használni – akik az egyes területekkel ismerősek, tudni fogják, hogy kinek vagy kiknek a munkájáról van szó.

1. A gyakorlati fémek mechanikai tulajdonságait elsősorban a diszlokációk határozzák meg. Megmutatták, hogy a diszlokáció hálózatok viselkedése lényegesen különbözik az egyedi diszlokációk tulajdonságainak az összegétől – így például a kimutatásukra használt Röntgen diffrakciós vonalalakjuk is.

2. A volfrám fém gyakorlati tulajdonságait igen kis mennyiségben jelenlévő idegen anyagok, szennyezések határozzák meg. Ezek kémiai analizését nemcsak a rendkívül kis mennyiségük, hanem az is megnehezíti, hogy az átmeneti fémeknél mindig számos igen bonyolult komplex fázis is képződik. Egy olyan számítógépes matematikai eljárást dolgoztak ki, amely lehetővé teszi az analitikai eredmények kvantitatív elemzését.

3. A halogénlámpákban állandó hő és anyagtranszport játszódik le. Megfogalmazták ezeknek a folyamatoknak a következetes, nemegyensúlyi termodinamikai leírását.

4. Szinterelt fémekben, kerámiaszerű anyagokban, mind a szerkezet kialakulása, mind a makroszkópikus tulajdonságok a pórusos szerkezettől függő jellegzetes viselkedést mutatnak. Megvizsgálták ezeknek a tulajdonságoknak a leírását jól modellező perkoláció elvi alapjait nemcsak a legegyszerűbb matematikai modelleken, hanem a gyakorlathoz közelebb álló anizotróp és véletlen eloszlással rendelkező rendszerekre is.

5. A félvezetők elektromos és optikai tulajdonságait elsősorban az idegen atomokon, hibahelyeken létrejövő átmenetek határozzák meg. Megfogalmazták a makroszkópikus rate egyenletek fenomenologikus, irreverzibilis termodinamikai leírását.

6. A rate egyenletekben megjelenő állandók a rendszer atomi tulajdonságaitól függenek. Különböző tipikus átmenetekre kidolgozták az elektronátmenetek mikroszkópikus, kvantummechanikai elméletét.

7. Ugyanezen állandók a tértöltési tartományban végzett kísérletekből is meghatározhatók – azok kiértékelését a gyakorlati esetekben megnehezíti a nívók, az átmenetek nagy száma. Számítógépes eljárást dolgoztak ki ilyen összetett rendszerek kiértékelésére.

A félvezető anyagok elektromos minősítése szempontjából legfontosabb galvanomágneses jelenségek alapja a Boltzman-egyenlet, és az abban fellépő szórás elméleti vizsgálata.

8. A plasztikusan deformált anyagokon végzett kísérletek lehetővé teszik a diszlokációk irányított szórásának közvetlen vizsgálatát. Ezeknek a méréseknek az értelmezésére meghatározták a diszlokációkon való szórás hatáskeresztmetszetét.

9. A klasszikus transzportelmélet alkalmazhatósága kérdéses igen nagy elektromos és mágneses terek esetén. Következtes közelítő transzportelméletet dolgoztak ki az igen nagy elektromos és mágneses terekben lejátszódó nemlineáris kvantumtranszport leírására.

10. Az atomi diffúzió ideális kristályban is általában több atom erősen csatolt mozgásával megy végbe. Kidolgozták a diffúzió általános elméletét, amely az igen könnyű, illetőleg igen nehéz atomok mozgásakor jellegzetes viselkedést mutat.

11. Igen vékony rétegekben a transzport tulajdonságok eltérőek a tömbi viselkedéstől. Ezt vizsgálták meg amorf félvezető rétegekre.

12. Az összetett rétegrendszerek optikai tulajdonságai és felépítése ellipszometriával határozható meg. Számítógépes eljárást dolgoztak ki a kísérleti adatok kiértékelésére több réteg esetén.

13. Számos esetben szükség volt a különböző eszközök (elsősorban mikrostrukturák) elméleti értelmezésére, méretezésére. Esetenként a kísérleti megvalósítás nehézségei miatt, azok számítógépes szimulálására, optimalizálására is.

A fenti, hiányos felsorolásból is látható (még ha talán a részletek nem is mindig érthetőek), hogy milyen sokrétűek lehetnek azok az elméleti, talán helyesebb lenne úgy fogalmazni, azok a matematikai és elméleti eszközökkel elvégzendő feladatok, amelyeket egy az MFKI-hoz hasonló intézetben a gyakorlat felvet. Valamit azonban szükséges rögzíteni. Attól, hogy matematikai módszereket használunk, nem biztos, hogy a megfelelő kutatás elméleti kutatás, elméleti fizika lesz.

Hogy az esetleges félreértéseket elkerüljük, szeretném hangsúlyozni,

hogy a jelen sorok írója mélységesen tiszteli (sőt maga is végzett ilyent) a fejlesztési munkák során felmerülő méretezési, tervezési szimulálási feladatokat. Egészen biztos, hogy egy összetett áramkör (esetleg csak egy elemének) a tervezése semmivel sem könnyebb matematikai feladat vagy kisebb szellemi teljesítmény, mint pl. egy többrészesekés kvantummechanikai rendszer alapállapotának a meghatározása. (Valószínűleg ezt ismerik el, amikor az előbbit végző szakembereket általában lényegesen jobban fizetik a fejlett ipari államokban!) Mégis a nemzetközi gyakorlatban az előbbit mérnöki, fejlesztő munkának, az utóbbit elméleti kutatómunkának minősítik.

De még ilyen esetekben is kellő óvatossággal kell eljárunk. Von Kármán munkásságának igen lényeges része egyszerűen a hangnál nagyobb sebességgel repülő gépek tervezéséhez volt szükséges. Ettől függetlenül, és függetlenül a ma szokásos (mondhatnánk divatos) hosszadalmas számítógépes modellezésektől, neki sikerült a hidrodinamika, a turbulencia területén maradandót alkotnia; és függetlenül a gyakorlati motivációtól soha senki sem vitatta, hogy a probléma, amivel foglalkozott elvi jelentőségű, elméleti fizika volt.

Ezért tudomásul kell venni, hogy bár éles határ nincsen, de a munkákat, amivel foglalkozunk, többé-kevésbé minősíteni lehet, ha nem is a probléma eredete, de annak alapján, hogy milyen céllal, milyen eszközökkel és esetleg milyen (maradandó) eredménnyel foglalkozunk egy adott feladattal.

Igy talán vitathatóan, de a 2., 7. és 12. pontban felsoroltak valószínűleg nem elméleti munkák, hanem a kísérleti munka befejező, kiértékelő lépései. Ez utóbbi a számítógépeknek rohamos elterjedésével ma már minden laboratóriumban természetes, mondhatnánk kötelező is.

AZ ELKÜLÖNÜLÉS UTJAI

A felsorolásból talán az is kiderült, hogy a gyakorlati élet (napjainkban a kutatások messze nem elégséges támogatása miatt egyre parancsolóbb) feladatai csaknem lehetetlenné teszik átfogó, igazán elvi problémák művelését. Természetesen az elméleti eszközöket használó kutató arra törekszik, hogy a feladatát a lehető legmélyebb szinten oldja meg. Miután talán kevésbé korlátozzák a materiális korlátok, ez rögtön magában hordozza

az elkülönülés lehetőségét. Ez a szükségszerű elkülönülés, amit azzal jellemezhetnénk, hogy egyre kevesebb a köze a gyakorlat által, esetünkben, az MFKI-ban felvetett problémákhoz, két fontos forrásból ered.

Az egyik az, hogy egy kicsit más szemmel nézi az elméleti beállítottságu ember a feladatát, mint aki egy adott kísérletet szeretne elvégezni, megérteni, vagy talán egy adott eszközt szeretne reprodukálni. Az elmélet számára legalább olyan fontos az általános elemek feltárása, mint a konkrét feladat megoldása, persze az út általában a konkrétól az általános felé vezet. Ezt a törekvést erősíti az a nem mindig beismert tény is, hogy a mai tulszervezett, szcientometriával átszőtt világunkban "jobban fizet" olyan problémákkal foglalkozni, amivel több területen, feltehetően többen foglalkoznak.

A másik, talán még fontosabb forrás, hogy mindenki szeretne az adott területen, az adott körülmények között a lehető legtöbb eredményt elérni. Ezt a "többet" azonban nem szükségképpen az Intézet, az adott laboratórium feladataihoz, hanem a hasonló területen a világ bármely táján dolgozó kutatók eredményeihez kell mérni. Szabadjon ezt két tipikus példával megvilágítani.

Amikor a 60-as évek közepén a félvezetőkben létrejövő elektronátmenetek, a rekombináció mikroszkópikus mechanizmusát vizsgáltuk, természetes volt a számolások eredményeit az éppen felfedezett injekciós lézer (ami nem más, mint egy jól szabályozott sugárzásos rekombináció makroszkópikus méreteken) kezdeti kísérleti adataival összevetni. Akkor sem lézer, sem azok az extrém körülmények (pl. nagy mágneses tér) nem voltak még az Intézetünkben, amelyek a nagy mágneses térben való rekombináció vizsgálatát indokolták volna; mégis természetes volt az általános megértésen kívül ezeket az izgalmas kérdéseket konkrétan is megvizsgálni.

A 70-es évek történetéhez kapcsolódik másik példánk. A volfrám kutatás miatt hagyományos szintereléshez kapcsolódva az Intézet tervbe vette az akkor már potenciálisan a jövő anyagának tartott kerámiák kutatását. A kerámiák előállítása (szinterelése), maradandó inhomogén szerkezete és az abból következő fizikai tulajdonságok mind modellezhetőek a matematikában már korábban ismert perkolációs jelenséggel. A perkoláció durván az, hogy ha valamely rendszerben véletlenszerű lokális kapcsolatokat hozunk létre,

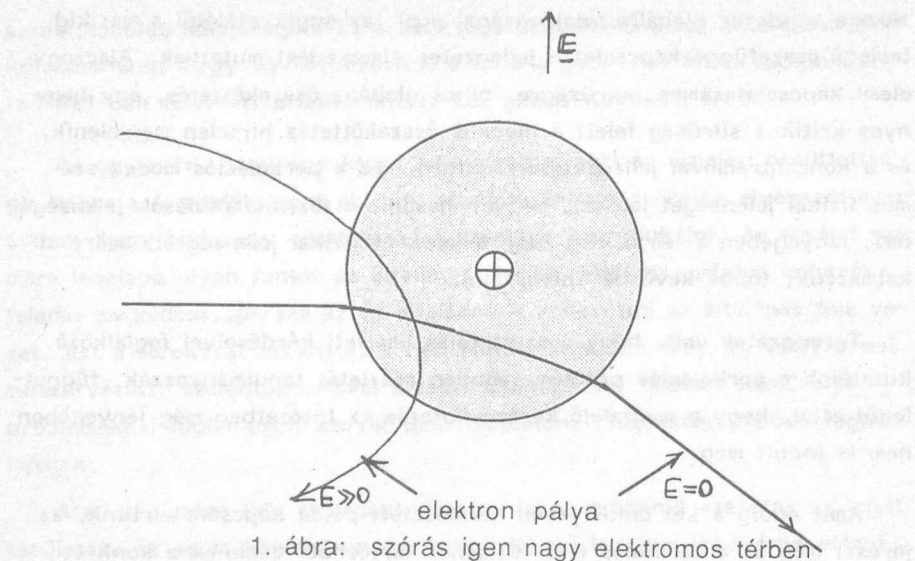
akkor a rendszer globális tulajdonságai – pl. az egyik szélétől a másikig terjedő összefüggő kapcsolat – jellegzetes viselkedést mutatnak. Alacsony elemi kapcsolatszámra, sűrűségre, nincs globális összeköttetés, egy bizonyos kritikus sűrűség felett a globális összeköttetés hirtelen megjelenik, és a koncentrációval jellegzetesen változik. Ez a perkolációs modell számos fizikai jelenséget leírhat, nagyon hasonló a fázisátalakulások jelenségéhez; lényegében a leírás alig függ a konkrét fizikai jelenségtől, amire alkalmazzuk, többé-kevésbé univerzális.

Természetes volt, hogy a szinterelés elméleti kérdéseivel foglalkozó kutatóink a perkolációs probléma minden részletét tanulmányozzák, függetlenül attól, hogy a megfelelő kerámiakutatás az Intézetben még lényegében nem is indult meg.

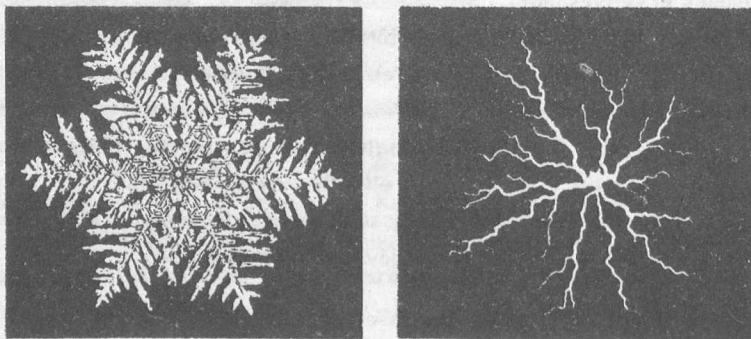
Amit eddig a két önkényesen kiválasztott példa kapcsán leírtunk, az jórészt még az elkülönülés első fázisához tartozhat. Ezeknek a konkrét munkáknak a kapcsán azonban olyan technikákat sajátítottunk el, olyan szakmai, emberi kapcsolatokra tettünk szert, hogy természetes módon olyan feladatokkal kezdtünk foglalkozni (esetleg részben külföldön), amelyek már kevésbé kötődnek az Intézet egyéb tevékenységeihez. A fenti két példán folytatva:

A rekombinációs elektronátmenetek csak részei az általánosabb transzport jelenségeknek. A 70-es évek végén a félvezető eszközök méreteinek rendkívüli csökkenésével felmerült a kérdés, hogy a szükségszerűen rendkívül nagy elektromos (és mágneses terek) módosítják-e a szokásos transzport-elmélet érvényességét. Szemléletesen szólva (1. ábra), ha pl. az elektromos tér igen nagy, akkor a töltött részecskéket nemcsak az ütközések között gyorsítja, hanem az ütközés elemi kvantummechanikai folyamatát is módosíthatja. Rendelkezve az általános kvantumtranszport eszközeivel, természetes volt ezzel a kérdéssel is foglalkozni, és sikerült többek közt az irodalomban hosszabb ideje meglevő ellentmondást feloldani – bár alig hihető, hogy a számolás eredményei kapcsolatba hozhatók olyan kísérletekkel, amelyeket az MFKI-ban a belátható jövőben végezhetünk.

A másik területen a perkoláció esetében az elméleti munka során olyan hatásos számolási módszert, a Monte Carlo szimulációt sajátították el kutatóink, hogy amikor a 80-as évek elején az érdeklődés a mintázatképződés

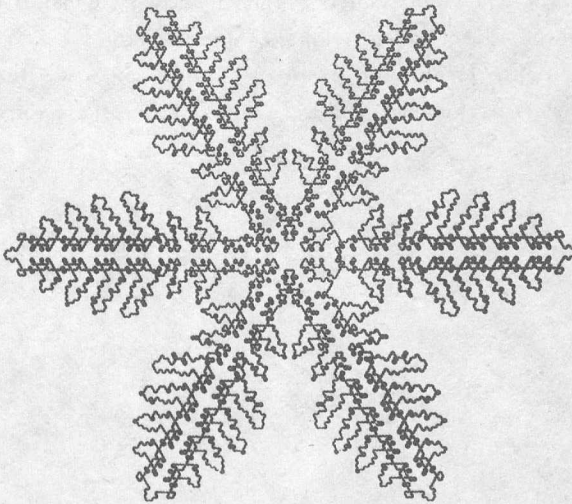


felé fordult, természetes módon tudták a saját módszereiket hatásos módon alkalmazni ezen az új területen is. A mintázatképződés igen sok fizikai jelenség, - pl. kristálynövekedés, dielektromos letörés (villám), határfelületek kialakulása közel kétdimenziós folyadék és növekedő légzárvány között... - közös megnyilvánulása. Ezt a hasonlóságot jól szemlélteti a 2. ábra, amelyen egy hókristály és egy alkalmasan rögzített dielektromos letörés képe látható egymás mellett.



2. ábra

A hasonlóság valószínű alapja a változást hajtó mikroszkópikus nemlineáris egyenletek azonos szerkezete a különböző esetekben. Tényleg a legutolsó évek eredménye, hogy a korábban túl bonyolultnak látszó rendszerek (pl. hókristályok) kialakulását is megkísérelték követni. Ez csak részben köszönhető az egyre hatásosabb számítógépek elterjedésének, inkább az játszott közre, hogy a statisztikus fizikával foglalkozó kutatók az elmúlt évtizedben megszokták, hogy az igen bonyolult viselkedéseknek is lehet lényegében egyszerű alapja. Ezt a várakozást fényesen igazolja, hogy a hókristály közel sem egyszerű képét csaknem tökéletesen sikerült kutatónk-nak szimulálnia számítógépes mintázatképződéssel, ha a mintázat kialakulását a természetben valószínűleg megvalósuló diffúzió által limitált aggregációval írta le (3. ábra).



3. ábra

TALÁLKOZÁS MAGASABB SZINTEN?

A fenti példákon láttuk, hogy miképpen különül el az elméleti alapku-
tatás a közvetlen intézeti gyakorlattól. Az elemi dialektika azt sugallná,
hogy az eredményes elméleti munka is visszahat a kísérleti munkákra, mint
ahogy az összefogó elméleti diszciplinák kidolgozása mindig új kísérleti fel-
fedezésekre vezetett.

Valahogy az az érzésünk, hogy ez a folyamat, legalábbis a mai valósá-
gában, Intézetünkben némileg nehezebb. Ennek egyik lehetséges oka, hogy
az alapkutatásra szánt összegek annyira lecsökkentek, hogy ha még kuta-
tóink szeretnének is új jelenségek átfogó kísérleti vizsgálatával foglalkozni,
nem biztos, hogy minden anyagi és egyéb eszköz lehetőségükre állna.

Ezért a kísérleti és elméleti munka együttélésének a módja Intézetünk-
ben a közel jövőben is valószínűleg az lesz, hogy az elméleti eszközökkel
rendelkező kutatók időről-időre bekapcsolódnak egyes mérések, jelenségek
értelmezésébe; idejük jórésztében azonban törekednek a megfelelő területek
legfrissebb elméleti és kísérleti eredményeihez kapcsolódó kérdésekkel fog-
lalkozni.

